

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ –  
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství**  
Katedra tváření materiálu

VOLNÉ KOVÁNÍ DUTÝCH VÝKOVKŮ

OPEN DIE FORGING OF THE HOLLOW FORGED PIECES

diplomová práce

**Autor:**

Bc. Josef Šiška

**Vedoucí diplomové práce:**

doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Josef Šiška**

Studijní program:

N2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109T038 Moderní metalurgické technologie

Téma:

Volné kování dutých výkovků  
Open die forging of the hollow forged pieces

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Úvod

1. Kovárenské ingoty pro duté výkovky
2. Vlastnosti ocelí pro výkovky dutých těles
3. Rozbor technologických postupů kování dutých těles
4. Tepelné zpracování volných výkovků
5. Experimentální ověření vývoje struktury oceli C45
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] TOMLINSON, M., TALAMANTES, S. J., DAVIES, P. The development of hollow ingot technology at Sheffield. In *18th International Forgemasters Meeting, Market and Technical Proceedings, USA*, Pittsburgh, 2011, p. 175 – 178.
- [2] WOLFGARTEN, M., ROSENSTOCK, D., SCHAEFFER, L. et al. Implementation of an open-die forging process for large hollow shafts for wind power plants with respect to an optimized microstructure. *La Metallurgia Italiana*, 2015, No.4, p.43-49.
- [3] GREGER, M., PETRŽELA, J., LÁSZLÓ, V. Rozbor technologie kování dutých těles s vnitřním osazením. *Kovárenství*, 2011, č. 42, s. 9-12.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Vladimír László, Ph.D.

Datum zadání: 21.07.2016

Datum odevzdání: 26.08.2016



prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015



**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ведоми, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ведоми, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě ..... 15. 8. 2016 .....

..... Šiška Josef .....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Anotace**

Tématem diplomové práce je „Volné kování dutých výkovků“. Jedná se především o výrobu z dutých ingotů a rozboru technologických postupů kování pro tyto výkovky. Zejména pak vymezení jedné z nich a aplikaci na vzorky za účelem zkoumání změny materiálu při deformaci a jejich popisu. V teoretické části popisují vlastnosti výkovků a postup kování. Následuje praktická část, kde jsem zjišťoval mikrostruktury, deformaci jednotlivých vzorků při různých teplotách a sledoval změnu chování zrna při různých teplotách.

**Klíčová slova:** pěchování, vliv deformace, výkovek, zrna

## **Annotation**

Subject of the thesis is Open die forging of the hollow forged pieces, mainly manufacture of products made of hollow ingots and analysis of forging technological processes. A specific production technology was chosen for application on samples with aim to examine material changes during deformation and their description. In the theoretical part of the thesis the forged pieces characteristics and forging procedures are described. The following experimental part of the thesis is aimed at analysis of microstructures, deformation of respective samples and observation of grain changes in dependence on temperature variations.

**Keywords:** swaging, deformation effect, forged piece, grain

## **Poděkování**

Děkuji doc. Ing. Miroslavu Gregerovi, CSc. za ochotu a vedení mé diplomové práce. Dále paní laborantce Miroslavě Subíkové, že mi umožnila provádět experiment ve školní laboratoři a rovněž za ochotu a poskytnuté materiály. A především bych rád poděkoval rodině a mým blízkým za podporu během celého studia.

## Obsah

1	Úvod	1
2	Výroba ingotů pro výkovky dutých těles.	2
2.1	Kovárenské ingoty	2
2.1.1	Dutý ingot pro výrobu dutých těles a kroužků	3
2.2	Vnitřní vady ingotů	4
3	Oceli pro výkovky dutých těles	6
3.1	Uhlíkové konstrukční oceli	6
3.1.1	Ocel třídy 12 050	7
3.1.2	Ocel třídy 13 251	8
3.1.3	Ocel třídy 15 330	9
3.1.4	Ocel třídy 16 240	10
4	Vlastnosti dutých výkovků	11
4.1	Základní průřez výkovků	11
4.2	Základní tvary výkovků	11
4.2.1	Zásady pro osazování, prosazování a přírubové výkovky	13
4.3	Stanovení hmotnosti výkovku	15
5	Rozbor technologických postupů kování dutých těles	17
5.1	Návrh technologického kování dutého tělesa	17
5.1.1	Technologické zásady	19
5.1.2	Tvarové omezení	19
5.1.3	Rozbor operace zakování	20
5.2	Kovářské operace používané pro dutá tělesa	21
5.2.1	Pěchování	21
5.2.2	Děrování	22
5.2.3	Prodlužování na trnu	22
5.3	Výpočet velikosti deformace a síly	23



5.3.1	Výpočet deformační síly a práce při kování	23
5.3.2	Stupeň deformace a prokování	24
6	Ohřev polotovaru	26
6.1	Kovací teplota	27
6.2	Doba ohřevu	27
6.3	Vliv teploty na deformaci	27
6.4	Způsob ochlazování z dokovacích teplot	28
6.5	Jakostní tepelné zpracování	30
7	Metody zkoušení výkovků	32
7.1	Magnetické zkoušení	32
7.2	Kapilární zkoušení	32
7.3	Zkouška ultrazvukem	33
7.4	Radiografické zkoušení	33
7.5	Metoda vířivých proudů	34
7.6	Vizuální zkoušení	34
8	Experimentální část	35
8.1	Postup přechovací zkoušky	35
8.2	Postup metalografického výbrusu	37
8.2.1	Výsledky struktur	38
8.2.2	Určení velikosti zrna	43
9	Tvar a matematický popis vzorků	45
9.1	Numerické výpočty	47
10	Návrh technologického postupu kování kroužku	50
11	Závěr	55
12	Použitá literatura	56

# 1 Úvod

Výrobní základnu českého kovářenského průmyslu tvořilo k 31. 12. 2015 celkem 39 kováren. Výrobním programem jsou volné výkovky z ocelí. Z celosvětového hlediska ve výrobě volných výkovků připadá na Evropu 27 %, na Rusko 16 %, Dálný východ (Čína, Korea, Tchaj-wan) 20 %, Indie 5 %, USA a Kanada 14 %, Japonsko 10 %, Jižní a Střední Amerika 14%. V Evropě je v oblasti volného kování na prvním místě Německo se 47 %; na ČR připadají pouze asi 3 %.

Situace v ČR je rozdílná od situace v západní Evropě či ve světě. Zatím co u starších členů EU je obvykle uváděna stagnace či mírný nárůst, v ČR se ukazuje nárůst výroby o 10 až 14 %. Na tyto země se rovněž pohlíží jako na "nevítané" konkurenty, zejména v oblasti mzdových nákladů.

Cíl mé diplomové práce je popsat některé technologické postupy kování dutých těles. Pro většinu dutě kovaných výkovků se výchozím polotovarem stává ingot. Ten se skládá z hlavy, těla a paty. Hlava a pata tvoří nekvalitní materiál a proto se musí odřezat a odstranit. Tyto dvě části představují asi 30% hmotnosti ingotu.

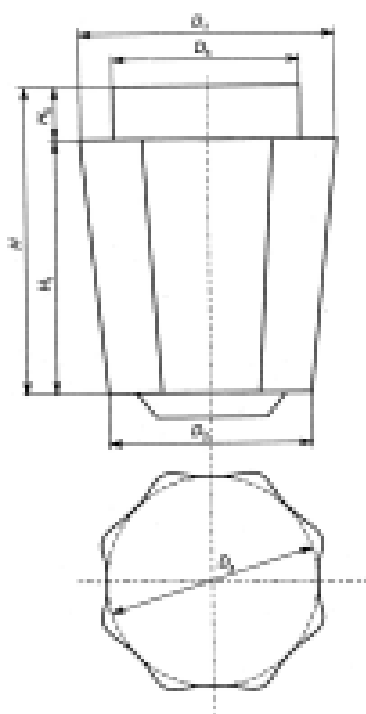
Nejčastěji prováděna kovářská operace je tzv. zkouška pēchováním. Tato zkouška je rovněž předmětem této práce, kdy výchozí polotovar tvořilo zkušební těleso válcovitého tvaru. Uvádí se, že jde o nejčastější tvar tělesa užívaný při pēchovací zkoušce. V experimentální části byly po zkoušce vzorky rozřezány a následně se prováděl metalografický výbrus. V této práci nechybí ani výsledky struktur jednotlivých vzorků, a jejich popis. V poslední řadě jsem se zabýval výpočty deformací každého ze vzorků. Také je zde rozbor průběhu deformace pēchovaného tělesa, určení velikosti zrna a vyobrazena závislost změn zrn při mēnících se teplot.

## 2 Výroba ingotů pro výkovky dutých těles.

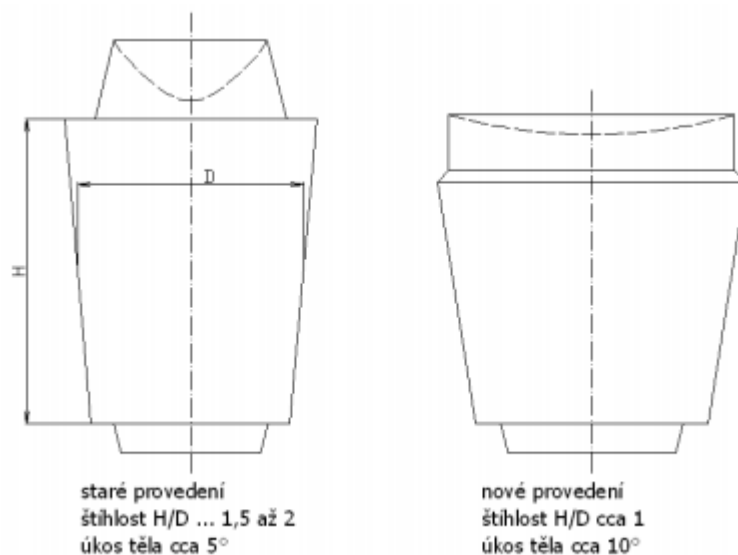
### 2.1 Kovárenské ingoty

Ingot je kovový hutní polotovár připraven pro další zpracování. Nejčastěji má tvar hranolu nebo jehlanu, případně s komplikovanějším průřezem a to buď s kruhovým, obdélníkovým nebo čtvercovým. Nejrozšířenější tvar u nás je osmihranný ingot. Délka ingotu je závislá na způsobu jeho výroby i na požadavcích vztahujících se k hutnímu zpracování, jinak řečeno k hutní výrobě.

V kovárnách se nejčastěji používají ocelové ingoty. Ocelové ingoty představují konečný produkt oceláren. Jejich samotná výroba ovlivňuje jejich tvar a vlastnosti. Po vyrobení ingotu se kokila stáhne a ingot putuje do pece, tak aby bylo zajištěno rovnoměrné prohřátí celého těla ingotu na požadovanou teplotu potřebnou k dalšímu zpracování. Další zpracování ingotu se provádí v kovárnách. Obrázek níže obr. 2.1 představuje tvar kovářského ingotu a obr. 2.2 geometrii kovárenského ingotu [1].

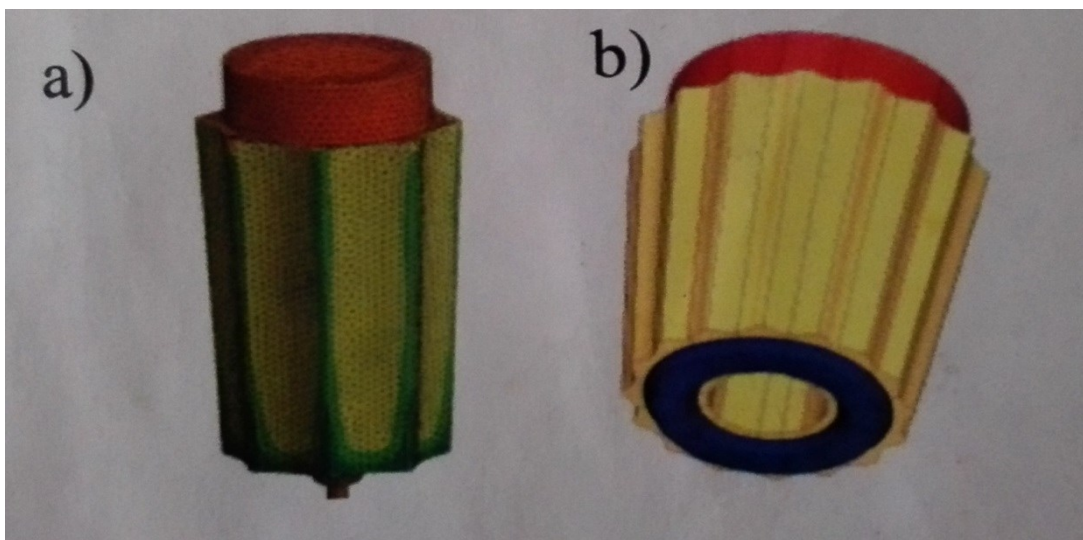


**Obr. 2.1** Tvar kovárenského ingotu



**Obr. 2.2** Geometrie kovárenského ingotu

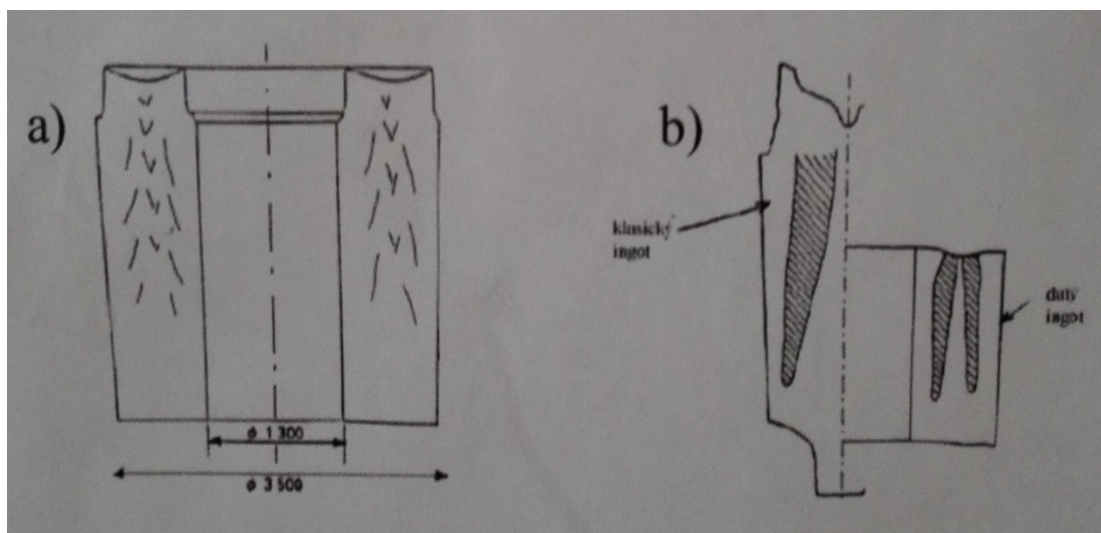
### 2.1.1 Dutý ingot pro výrobu dutých těles a kroužků



**Obr. 2.3a)** Běžný kovárenský ingot; **2.4b)** Dutý ingot

Duté ingoty (obr.2.3a a 2.4b) představují nejvhodnější polotovary pro kování dutých těles a velkých kroužků. Existuje několik způsobů jejich odlévání. Je možné využívat současných kokil, ale daleko výhodnější jsou ingoty vícepolygonového nebo válcového tvaru se štíhlostí rovno přibližně 1. Výhody Dutých ingotů vlivem zmenšení charakteristického průřezu je, že mají méně segregací v porovnání s plnými ingoty stejných hmotností (obr.2.5a). Segregace A a V jsou rovněž příznivěji rozloženy, obr. 2.6b [2].



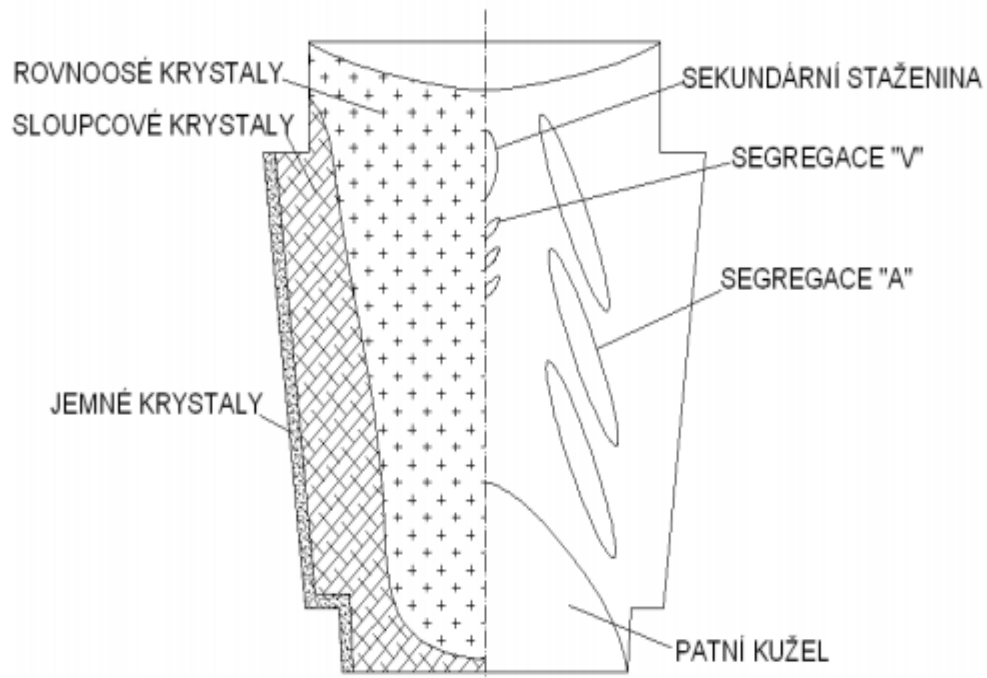


**Obr. 2.5a)** Segregace v dutém ingotu; **2.6b)** Porovnání segregaci v klasickém a dutém ingotu

Segregace-V se buď v tomto případě nevyskytují, nebo jsou jen patrné. Segregace-A jsou oproti tomu výrazné, ale zůstávají uvnitř stěny dutého ingotu. Při přípravě polotovaru pro dutá tělesa nebo kroužky z klasického ingotu s použitím kovářské operace děrování, se odstraňuje pouze část segregací. Zbývající segregace vystupují na vnitřní povrch vyděrovaného předkovku a mohou zhoršovat jeho kvalitu.

## 2.2 Vnitřní vady ingotů

Kovářské ingoty nabývají nejčastěji velkých rozměrů, a to má za následek výrazné rozvinutí segregáčních procesů. Následující obrázek (obr. 2.7) popisuje strukturu kovářského ingotu.



**Obr. 2.7** Struktura kovářenského ingotu

Na povrchu je vrstva jemných krystalů vzniklá rychlým ochlazením kovu ve styku s kokilou. Posléze následuje v radiálním směru tzv. ve směru obvodu tepla, vrstva protáhlých krystalů. Uprostřed je oblast hrubých rovnoosých krystalů. V této části struktury se vyskytují vady, kterým se říká segregace. V konkrétním případě z obr. 2.7 jde o segregace-V. Ty se nevyskytují v případě, pokud má ingot vhodnou geometrii. Za vhodnou geometrii je považována štíhlost kolem 1 a dostatečný úkos těla [2].

### 3 Oceli pro výkovky dutých těles

#### 3.1 Uhlíkové konstrukční oceli

Řeč je především o uhlíkových konstrukčních ocelích třídy 11 – 17. Zde rozbor vybraných konstrukčních ocelí pro výkovky dutých těles: třída 12, třída 13, třída 15 a třída 16 [3].

##### Konstrukční ocel třídy 12:

Jde o ušlechtilé konstrukční oceli, neobsahující žádné legury. Jejich široké využití je podle obsahu C přibližně v rozmezí 0,07% až 0,9%.

Tepelným zpracováním je možné získat velké množství užitečných vlastností. Tento typ oceli má široké využití a je dodáván ve stavu přírodním resp. kovaném. Oceli třídy 12 jsou prokalitelné až do průměru 40 mm.

##### Konstrukční oceli třídy 13:

Základní legující prvky oceli jsou mangan a křemík (Mn více jak 1% a Si víc jak 0,5%). Používají se tam, kde svými vlastnostmi příliš nevyhovuje ušlechtilá uhlíková ocel a kde by chromová nebo chromniklová byla příliš nákladná. Mangan jak je známo je často levnou a dobrou náhradou za nikl.

Oceli této třídy lze zušlechťovat. Nehodí se k cementování, neboť při dlouhém ohřevu při cementování hrubnou a při kalení hrozí riziko vzniku trhlin.

Mají vysokou pružnost a dostatečnou houževnatost. Jsou známé jako pružinové oceli [4].

##### Konstrukční oceli třídy 15:

Tyto oceli jsou legované v kombinaci chromem a vanadem nebo molybdenem popř. wolframem. Použití těchto ocelí je hlavně na vysokotlaké kotle a trubky, na součástech parních turbín a jiných součástí namáhané za tepla. Oceli tedy jsou žárovevné, tj. mají vysokou mez tečení.

##### Konstrukční oceli třídy 16:

V kombinaci pevnostních charakteristik a houževnatosti jsou oceli této třídy považovány obecně nejlepší. Jsou to oceli ušlechtilé slitinové nízko a středně legované určené k tepelnému zpracování. Základní legující prvek je nikl v kombinaci prvků např. s chromem, molybdenem, wolframem či vanadem.

Ocel je vhodná na velmi namáhané strojní součásti a součásti silničních motorových vozidel např. klikové a spojovací hřídele, čepy aj. [4].

### 3.1.1 Ocel třídy 12 050

Skupina ocelí podle ČSN 42 0074	Chemické složení oceli v hm. %							
Chemické složení v %	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
	0,42 až 0,50	0,50 až 0,80	0,17 až 0,37	max. 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040
Třída odpadu podle ČSN 42 0030	002							
Barevné označení podle ČSN 42 0010	Zelená- červená - černá							
Druh oceli podle způsobu výroby	Elektroocel							
Výrobek:	Kované výkovky / tyče							
Provedení:	Tváření za tepla							
Povrch:	Okujený							

Ocel je vhodná pro hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů apod. Na větší ozubená kola, šneky, zubené věnce, rotory, ojnice, pístnice, vřetena, písty kompresorů, čepy, šrouby, dopravní válečky, páky, vrtací tyče, frézovací trny [5].

- Kování 1150 až 800°C
- Normalizační žihání 840 až 870°C
- Žihání na měkko 680 až 720°C
- Kalení do oleje 830 až 860°C
- Popuštění 530 až 670°C



### 3.1.2 Ocel třídy 13 251

Skupina ocelí podle ČSN 42 0074	Chemické složení oceli v hm. %							
Chemické složení v %	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
	0,42 až 0,52	0,50 až 0,80	1,50 až 1,90	max. 0,30	max 0,40	max 0,30	max 0,035	max 0,035
Třída odpadu podle ČSN 42 0030	0,01							
Barevné označení podle ČSN 42 0010	Fialová - žlutá - černá							
Druh oceli podle způsobu výroby	Elektroocel							
Výrobek:	Volné výkovky / tyče							
Provedení:	Tváření za tepla							
Povrch:	Okujený							

Ocel je vhodná k zušlechťování. Má dobrou odolnost proti otěru. Isotermickým kalením této oceli lze dosáhnout při stejné pevnosti v tahu vyšší vrubové houževnatosti a odolnosti proti otěru nebo při zušlechťování. Ocel je vhodná na méně namáhané pružiny, např. hospodářských strojů, kuželové, šroubovitě a ploché pružiny, pružnice kolejových vozidel, listy k pružinovým bucharům apod. [5].

- Kování 1150 až 800°C
- Normalizační žihání 840 až 880°C
- Žihání na měkko 650 až 700°C
- Kalení do oleje 840 až 880°C
- Popuštění 570 až 680°C

### 3.1.3 Ocel třídy 15 330

Skupina ocelí podle ČSN 42 0074	Chemické složení oceli v hm. %							
Chemické složení v %	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
	0,24 až 0,34	0,40 až 0,80	0,17 až 0,37	2,30 až 2,70	0,20 až 0,30	0,15 až 0,30	max. 0,035	max 0,035
Třída odpadu podle ČSN 42 0030	0,81							
Barevné označení podle ČSN 42 0010	Bílá – zelená - žlutá							
Druh oceli podle způsobu výroby	Elektroocel							
Výrobek:	výkovky							
Provedení:	Tváření za tepla							
Povrch:	Okujený							

Tato ocel je vhodná k zušlechťování a vhodná k nitridování. Je dobře tvárná za tepla a dobře obrobitelná ve stavu žíhaném na měkko i ve stavu zušlechtěném. Užití této oceli je pro součásti strojů, u nichž se vyžaduje velká povrchová tvrdost při dobré houževnatosti, např. zalomené hřídele, váčkové hřídele, spojovací součásti energetických zařízení. Optimální průměr zušlechtění je asi 100 mm. Tvrdost nitridační vrstvy je asi 750HV. Ocel se užívá též pro výkovky dutých těles [5].

- Kování 1150 až 800°C
- Normalizační žíhání 800 až 860°C
- Žíhání na měkko 700 až 740°C
- Kalení do vody 830 až 880°C
- Kalení do oleje 850 až 890°C
- Popuštění 550 až 650°C
- Nitridování asi 500°C

### 3.1.4 Ocel třídy 16 240

Skupina ocelí podle ČSN 42 0074	Chemické složení oceli v hm. %						
Chemické složení v %	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	0,32	0,35	0,17	0,50	1,20	max	max
	až	až	až	až	až	0,03	0,03
	0,40	0,70	0,37	0,90	1,70	5	5
Třída odpadu podle ČSN 42 0030	0,23						
Barevné označení podle ČSN 42 0010	Oranžová – žlutá - černá						
Druh oceli podle způsobu výroby	Elektroocel						
Výrobek:	Volné výkovky,						
Provedení:	Tváření za tepla						
Povrch:	Okujený						

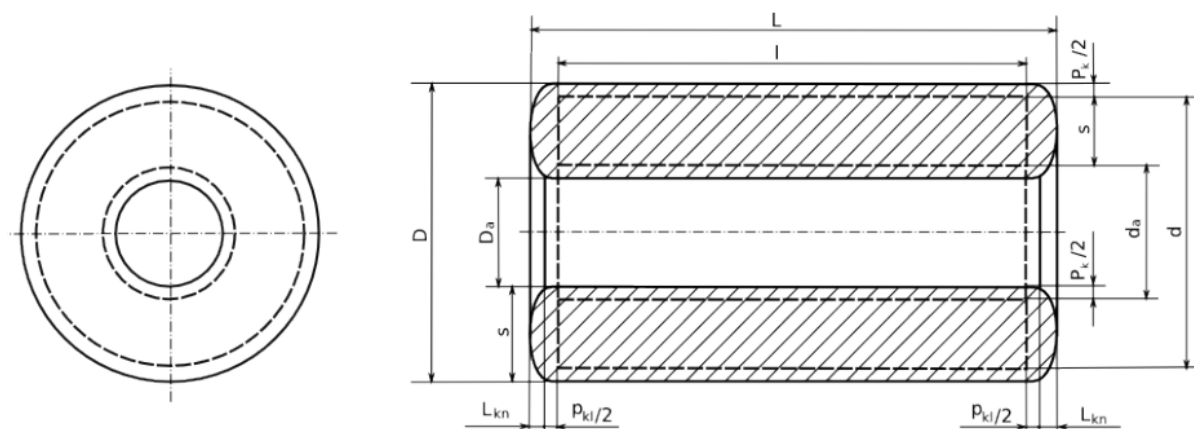
Ocel je dobře tvárná za tepla, dobře obrobitelná, vhodná na namáhané strojní součásti, u nichž se žádají vyšší plastické hodnoty při střední pevnosti. Optimální průměr nebo tloušťka zušlechťení je cca 65 mm. Použití této oceli např. pro výrobu předvalků, výkovků ocelových volných tyčí za tepla válcovaných [5].

- Kování 1150 až 800°C
- Normalizační žíhání 850 až 890°C
- Žíhání na měkko 700 až 750°C
- Kalení do vody 810 až 850°C
- Kalení do oleje 830 až 870°C
- Popuštění (voda) 470 až 550°C

## 4 Vlastnosti dutých výkovků

### 4.1 Základní průřez výkovků

Řeč je o výkovcích dutých těles neosazených, osazených, prosazených a přírubových volně kované za tepla ze surových ingotů. Základní průřez výkovku dutého tělesa znázorňuje schéma níže obr. 4.1 [6].



**Obr. 4.1** Základní průřez výkovku dutého tělesa

Popis značení:

$d, d_a, l, s$  ... rozměry obrobeneho výrobku

$D, D_a, L, s_1$  ... rozměry výkovku

$p_k$  ... přídavek na obrábění - na průměr

$p_{kl}$  ... přídavek na obrábění – na délku

$L_{kn}$  ... nerovnost konců výkovku

Výkovky dutých těles se vyrábějí s vnitřním průměrem, který je  $D_a \geq 80$  a tloušťku stěny  $s \geq 30$ . U délky výkovku pro dutá tělesa platí omezení že:  $0,52D_r \leq L \leq 15D_r$  Kde  $D_r$  je redukovaný průměr výkovku.

### 4.2 Základní tvary výkovků

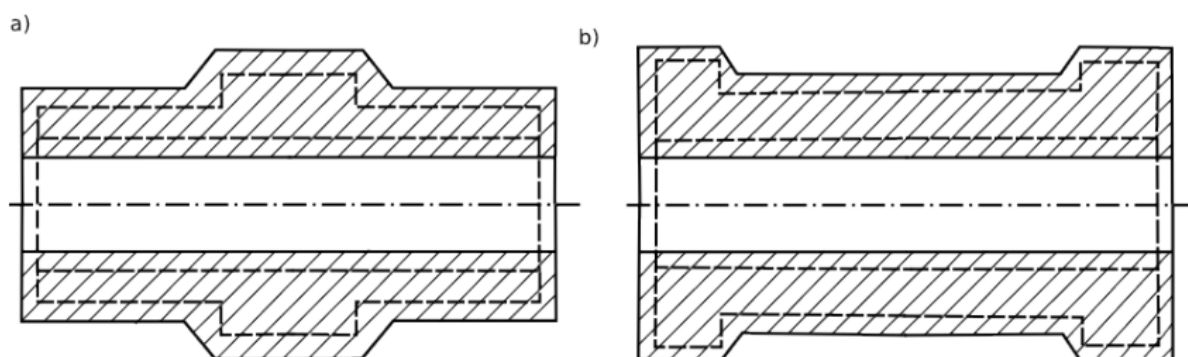
a) výkovky neosazené

b) výkovky osazené a prosazené

c) výkovky přírubové

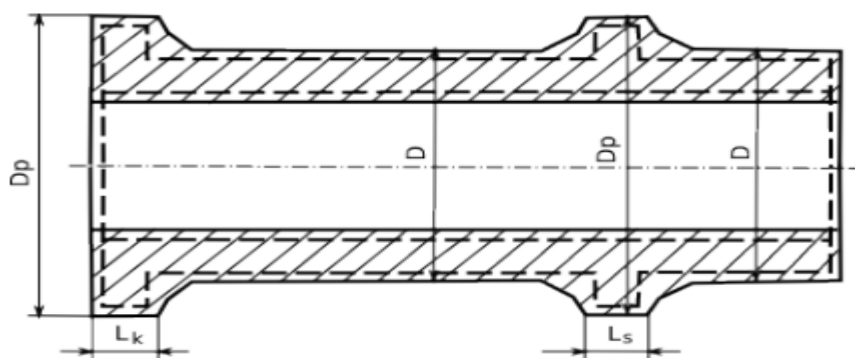


- a) U neosazených výkovků nelze u nich provádět kovářské osazení. Jsou to výkovky, u kterých se jejich průřez po délce nemění.
- b) U osazených a prosazených výkovků se jejich průřez po délce mění.



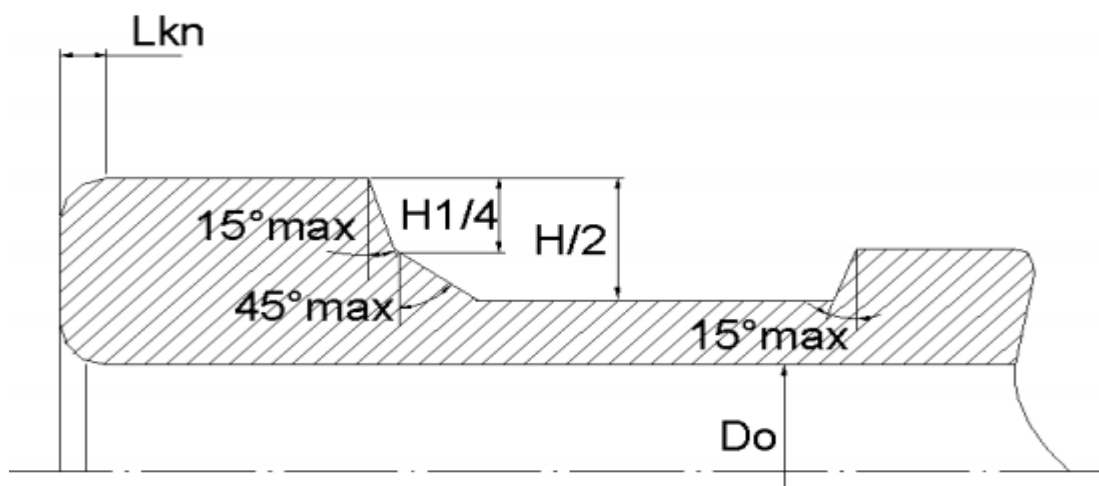
**Obr. 4.2** a) výkovky osazené, b) výkovky prosazené [6]

- c) Přírubové výkovky jsou zvláštní případ výkovků dvou přechozích.



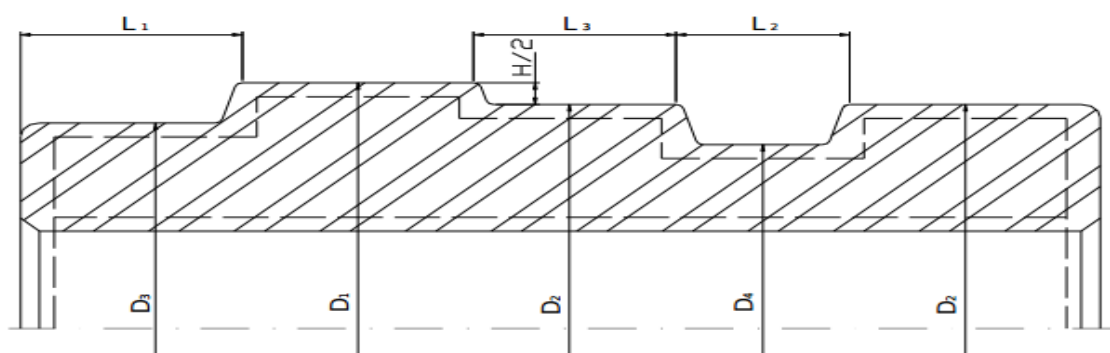
**Obr. 4.3** Tvar přírubového výkovku [6]

Tyto typy výkovků se vyrábějí pýchováním špalků s následujícím děrováním a posléze prodlužováním na trnu. Otvory u těchto výkovků se dle normy ČSN 42 9014 neosazují. V případech nerovnosti konců značí se jako  $L_{kn}$ , by neměla být větší než 1/4 vnitřního průměru. Boční úkos nesmí přesahovat velikost  $15^\circ$  do 1/4 velikosti osazení nebo prosazení. 45% je zbývající částí.



**Obr. 4.4** Nerovnosti konců a boční úkosy [7]

#### 4.2.1 Zásady pro osazování, prosazování a přírubové výkovky



**Obr. 4.5** Zásady pro osazování a prosazování [7]

Osazování a prosazování je prováděno u výkovků s délkou  $L$  větší než  $1,5 D_r$ . Poměry mezi průměry jednotlivých částí osazeného výkovku má následující omezení:

$$D_1 : D_{2;3} \leq 1,4$$

$$D_2 : D_4 \leq 1,4$$

$$D_1 : D_4 \leq 1,8$$

Při nedodržení z některých podmínek se zvětšuje průměr osazení tak, aby podmínky byly splněny [10].

**Míra osazení** označující  $H$  se stanovuje jako:

$$20 \leq H \leq \dot{u}_h + \dot{u}_d \quad (1)$$

Kde:

$\alpha_h$  je horní mezní úchylka

$\alpha_d$  je dolní mezní úchylka.

Pokud míra osazení nevyhovuje vztahu uvedenému výše, výkovek se neosazuje.

Výpočet **délky koncového osazení** nese označení  $L_1$  a stanoví se jako:

$$L_1 \geq 0,2 \cdot D_1^3 / D_3^2$$

$$100 \leq L_1 \leq 0,1 L \quad (2)$$

Pokud délka koncového osazení neodpovídá výše uvedeným podmínkám, zvětší se průměr nebo délka koncového osazení za pomoci technologickému přídavku a to tak, aby byly podmínky splněny.

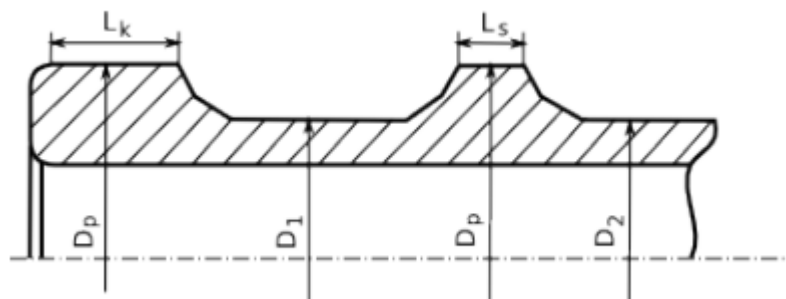
**Délka přilehlého osazení**  $L_3$  se stanovuje takto:

$$L_3 \cdot D_2^2 + L_2 \cdot D_4^2 \geq 0,2 \cdot D_1^3$$

$$100 \leq L_3 \leq 1,2 D_1 - D_2 / 3$$

$$L_3 \geq 0,1 L \quad (3)$$

Přírubové výrobky:



**Obr. 4.6** Zásady pro přírubové výrobky [7]

Výpočet **délky koncové příruby**  $L_k$ :

$$150 \leq L_k \leq (D_p - D_1) / 2 + 0,07 D_p \quad (4)$$

Výpočet **délky středové příruby**  $L_s$ :

$$100 \leq L_s \leq 0,7 (D_p - D_1) / 2 + 0,07 D_p \quad (5)$$

V obou případech:

$D_p$  ..... průměr příruby (mm)

$D_1$  ..... průměr menšího osazení nebo prosazení vedle příruby (mm)

#### 4.3 Stanovení hmotnosti výkovku

Při určování druhu výchozího polotovaru je rozhodující požadovaná hmotnost. Stanovení potřebné hmotnosti výkovků označující jako  $G_p$ , je hmotnost potřebná pro kováře, aby mohl výkovek vykovat.

$$\text{Vzorec pro stanovení hmotnosti výkovku: } G_p = G_{\text{kov}} + G_{\text{opal}} + G_{\text{prokroj}} \quad (6)$$

Kovaná hmotnost výkovku  $G_{\text{kov}}$  je počítána podle druhu výkovků.

Ztráta opalem  $G_{\text{opal}}$  je různá, závisí na druhu výkovků a pohybuje se v rozmezí od 0,8 do 1,8%.

Ztráta sekáním  $G_{\text{prokroj}}$  je hmotnost kotouče o průměru sekaného konce nebo špalku a výšky rovnající se šířce sekáče:

šířka použitého nože  $b = 40\text{mm}$  pro průměry do 600mm,

šířka použitého nože  $b = 80\text{mm}$  pro průměry nad 600mm.

Podle této potřebné hmotnosti se stanovuje formát ingotu, kdy samozřejmě je třeba mít zaručeno požadovaného stupně prokování PK.

Výrobce ingotů určuje směrné využití ingotů a minimální metalurgické pochody. Technolog vypočítá hmotnost vstupního polotovaru a vybere ingot s nejbližším vyšším směrným využitím těla při dodržení všech zásad a podmínek (viz tab. 4.1). [8]

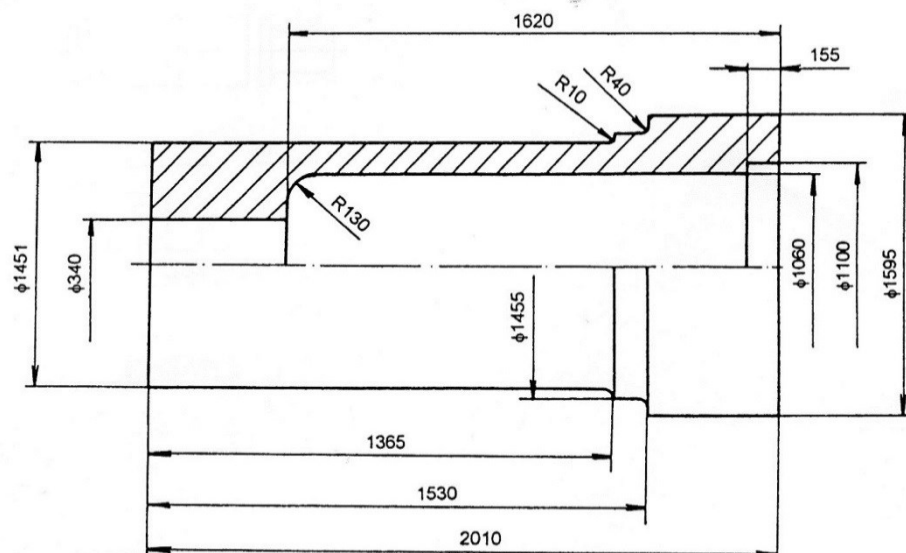
**Tab. 4.1** Hmotnosti kovárenských ingotů [8].

Typ ingotu	Hmotnost (kg)				Úkos těla kt(%)	Štíhlost těla $h_i / d$	Rozměry (mm)				
	těla	hlavy	paty	celková			h	$h_1$	d	$d_1$	$d_2$
8K21	17 000	3 350	650	21000	3,9	1,91	3 340	2 085	1085	1 166	1004
8K27	21500	4600	900	27 000	3,8	1,89	3 565	2 230	1 180	1265	1095
8K34	27000	5 900	1 100	34 000	3,7	1,84	3 880	2 360	1285	1375	1 197
8K43	34 000	7 600	1400	43 000	3,7	1,79	4 115	2 565	1400	1494	1306
8K53	42 000	9 300	1700	53 000	3,6	1,75	4 365	2 645	1515	1611	1419
8K64	50 000	11850	2 150	64 000	3,6	1,72	4 680	2 770	1615	1714	1 516
8K76	59 000	14 500	2 500	76 000	3,5	1,68	4 900	2 880	1 720	1821	1619
8K91	70 000	18 000	3 000	91000	3,5	1,63	5 160	2 990	1840	1944	1 736
8K109	83 000	22 500	3 500	109 000	3,4	1,61	5 465	3 155	1950	2 058	1 842
8K130	98 000	27 800	4 200	130 000	3,4	1,60	5 805	3 305	2 070	2 182	1958
8K155	116 000	34 000	5 000	155 000	3,4	1,59	6 295	3 495	2 190	2 305	2 072
8K185	137 000	42 000	6 000	185 000	3,3	1,57	6 620	3 650	2 330	2 451	2 209

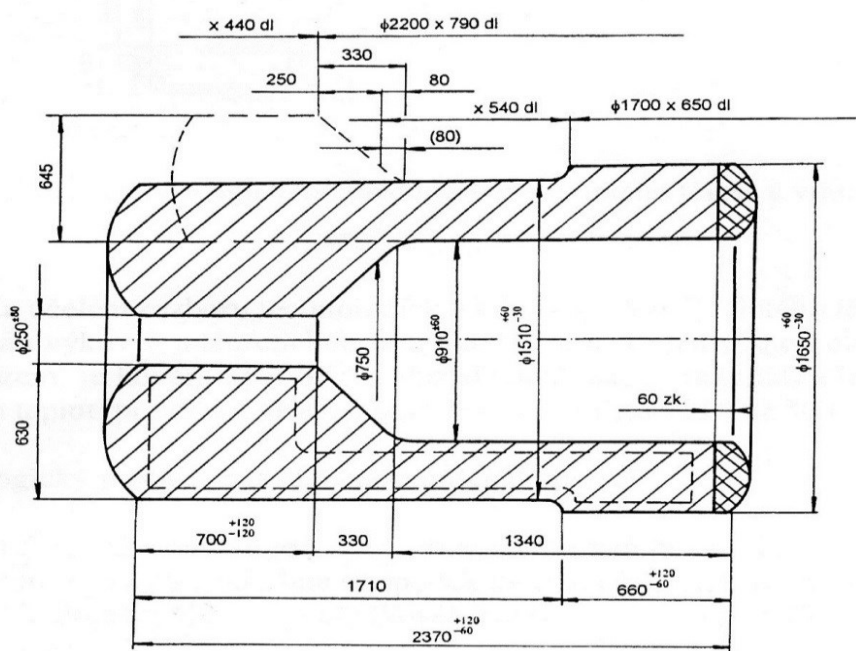
## 5 Rozbor technologických postupů kování dutých těles

### 5.1 Návrh technologického kování dutého tělesa

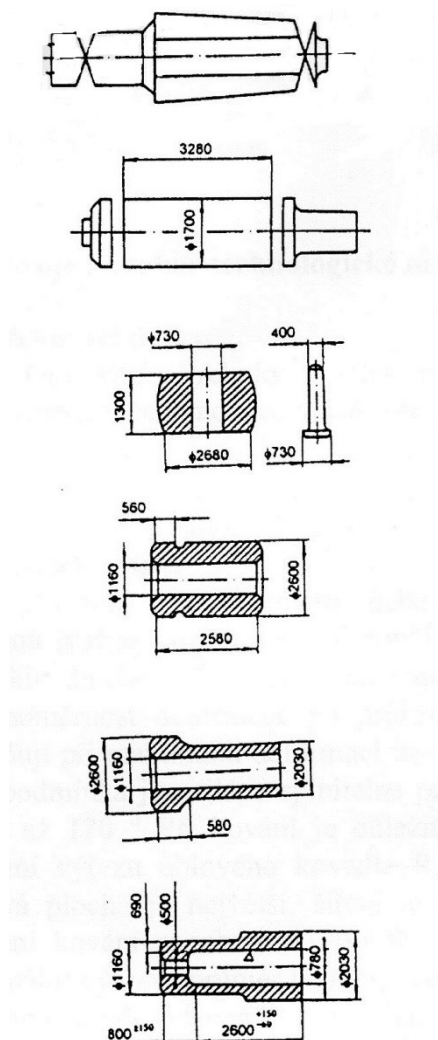
Postup kování rozměrného dutého tělesa s vnitřním osazením je v tomto případě zaměřeno pro kování na hydraulických lisech. Schéma opracovaného výrobku je možné vidět na (viz obr. 5.1) a kovářský náčrtek výkovků dutého tělesa po zakování na (obr. 5.2) [9].



Obr. 5.1 Tvar a rozměry obrobenej součásti [9]



Obr. 5.2 Kovářský náčrtek výkovku dutého tělesa s vnitřním osazením [9]



**Obr. 5.3** Schéma technologického postupu kování dutého tělesa s vnitřním osazením [10]

Za účelem rozboru technologického postupu kování dutého tělesa s vnitřním osazením byl dán výkovek s hmotností kolem 49 000 kg (jedná se o teoretickou hmotnost). Vstupní polotovár tvořil ingot 8K91. Výkovek byl vyroben z oceli ČSN 15 330. Interval kovacích teplot pro danou ocel se pohybuje v rozmezí 1150 až 800 °C [10].

Technologický postup je sestaven z následujících operací:

- Po prvním ohřevu se z hlavy ingotu vykoval tzv. manipulační čep. Provedlo se překování hran ingotu a spodní část ingotu se odsekl. Následovalo sazení do pece.
- V druhém ohřevu se předkovek napěchoval na průměr 2850 mm a na výšku 2000 mm.
- V třetím ohřevu se předkovek prodlužoval na průměr 1700 mm a odsekl se špalek o rozměrech 1700 x 3280 mm.

- Pěchování na výšku  $h = 1300 \text{ mm}$  ( $\varnothing = 2680 \text{ mm}$ ) a děrování ze strany paty ingotu dutým trnem o průměru  $\varnothing = 730 \text{ mm}$ .
- Pak rozkování na trnu na vnitřní průměr  $1250 \text{ mm}$  (rozměry: vnější průměr  $\varnothing = 2770 \text{ mm}$  na vnitřní průměr  $\varnothing = 1250 \text{ mm}$ , délka číní  $L = 1450 \text{ mm}$ ).
- Prodlužování na trnu na vnější průměr  $\varnothing = 2600 \text{ mm}$ .
- Předkovat na  $\varnothing = 2080 \text{ mm}$  a vykovat předkovek [10].

### 5.1.1 Technologické zásady

Způsob osazení se provádí v závislosti na míře osazení  $h_y$  a v závislosti na velikosti průměru příložky značící se jako  $D_{pr}$ :

- Kovadlem, pokud  $h_y \leq 3/2 D_{pr}$
- Provádí se označení kruhovou příložkou, a kovadlem  $h_y \leq 2D_{pr}$
- Kruhovou příložkou, zaseknutím tříhranu a kovadlem  $h_y \geq 2D_{pr}$

$$\text{Kde } h_y = \frac{D_0}{D_1} \quad (7)$$

$$D_{pr} = 0,05 D_0 \geq 10 \text{ mm.}$$

Při osazování dochází v místě přechodu mezi průměry  $D_0$  a  $D_1$  k zúžení, volí se před osazováním tzv. zabírací průměr podle vztahu:

$$D = D_0 + 1/7 (D_0 - D_1) \quad (8)$$

### 5.1.2 Tvarové omezení

Pro určení minimálního osazení a minimální délky koncového osazení lze využít vztahů:

$$h_{min} = (u_s + u_h) (1 = l/2L) \quad (9)$$

$$l_{min} \geq 0,2 D_3^2 / D_1^2 \geq 0,1L \quad (10)$$



Při kování dutých těles platí pro rozměry děrovaného kotouče vztahy:

$$H_p \geq t_k \quad (11)$$

$$t_{kmin} = 0,1 D_k$$

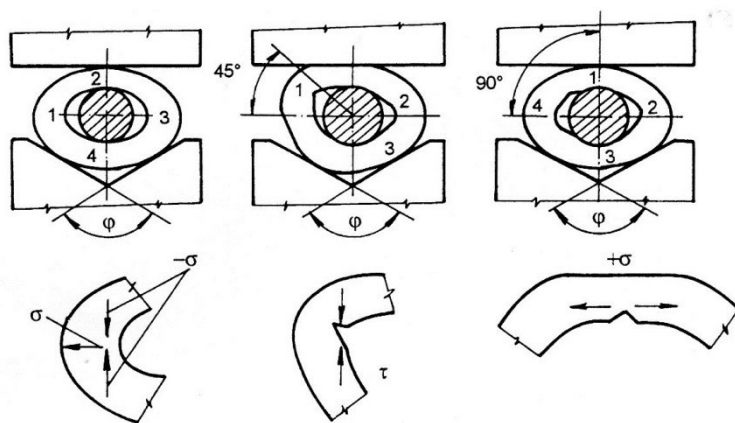
Kde:

$H_p$  je výška špalku,

$t_{kmin}$  tloušťka stěny dutého tělesa

### 5.1.3 Rozbor operace zakování

Při zakování dutého tělesa mohou vznikat na vnitřním povrchu zakovávaného konce trhliny a přeložky. Schéma vzniku vad trhlín a přeložek lze vidět na obrázku níže (obr. 5.4).



**Obr. 5.4** Schéma vzniku trhlín a přeložek vnitřním povrchu dutého tělesa při operaci zakování [11].

Riziko vzniku vad se zvětšuje s rostoucí mezerou mezi trnem a dutým tělesem ( $\approx 30$  mm). Také při větším úhlu spodního kovádky  $\varphi$  a při malém úhlu  $\gamma$  obepnutí polotovaru kovádky (na obr. oblast 4,  $\varphi = 120^\circ$ , a  $\gamma = 60^\circ$ ) a v neposlední řadě vlivem velkých stlačení, kdy deformace probíhá bez kontaktu s trnem. Při prvním docházejícímu stlačení se z obrázku oblasti 1 a 3 po obvodu roztahují. Mohou vznikat trhliny na vnějším povrchu zakovaného dutého tělesa. Při pootočení o  $45^\circ$  a dalším záběru v oblasti vzniknou velká smyková napětí a to i v místech, kde materiál byl při předcházejícím úběru intenzivně stlačován. Právě v tomto místě se pravděpodobnost výskytu trhlín výrazně zvyšuje.

Jestliže se zakování provádí při hranění o  $90^\circ$ , tak se schéma vzniku trhlin nebo přeložek výrazně nemění. Pravděpodobnost vzniku trhlin lze snížit, když se zmenší velikost jednotlivých stlačení, úhel a hranění a pokud se zmenší úhel výřezu ve spodním kovádle např. ( $\varphi = \gamma = 90^\circ$ ) [11].

## **5.2 Kovářské operace používané pro dutá tělesa**

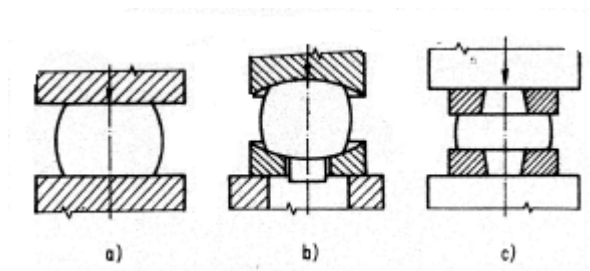
### **5.2.1 Pěchování**

Kovářská operace, při které se zvětšuje průřez materiálu a délka naopak zmenšuje. Účelem této operace je zhotovení výkovku, jehož příčný průřez přesahuje příčný průřez výchozího materiálu, dosažení dokonalejšího rozrušení lící struktury, zvýšení stupně prokování a uzavření vnitřních dutin a zmenšení anizotropie mechanických vlastností. Pěchování se charakterizuje nerovnoměrným průběhem deformace v jednotlivých částech tvářeného materiálu. Následkem toho vznikají v obvodě pěchovacího materiálu přídatná tahová napětí a ta mohou dát vzniku podélných obvodových trhlin. Tvar napěchovaného polotovaru se dá trochu brát jako obrazem rozdělení deformace po jeho výšce. Soudkovitost vypovídá minimální deformaci v oblasti třecích kuželů, vydutí je pak podmíněno maximální deformací v dané oblasti. Vznik soudkovitosti nebo vydutí ovlivňují činitelé jako je vnějšího tření, rychlost deformace a poměr výšky a průměru výchozího polotovaru. Výška výchozího materiálu je omezena vztahem:  $H_0 \leq 2,5 d_0$  [11].

#### Základní způsoby pěchování:

Možné způsoby pěchování lze vidět na obr. 5.5.

- a) Pěchování rovnými deskami (obr.5.5a) pro pěchování menších polotovarů, kotoučů nebo desek.
- b) Pěchování tvarovými deskami (obr.5.5b) pro pěchování ingotů určené k další operaci prodlužování.
- c) Pěchování v jednoduchých přípravcích (obr. 5.5c) pro pěchování přírubových kotoučů s jedním nebo dvěma koncovými osazeními [11].

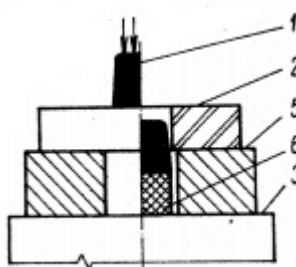


**Obr. 5.5** základní způsoby pēchování [12]

### 5.2.2 Dērování

Tato operace nám umožňuje vytvářet otvory ve výkovku. Dēruje se na podložené desce s otvorem za pomoci dērovacího trnu. Dērovací trn má mírně kuželovitý tvar a za pomoci nastavných přílohek se vtlačuje do dērovaného materiálu. Tím, že je dērovací trn vtlačován do materiálu dochází k porušení jeho původního tvaru.

Díry do průměru asi 400mm se dērují plným dērovacím trnem, znázorňující obr 5.6. Větší díry do průměru 500mm se dērují dutým trnem a nese sebou výhody jako: Působení menší síly, neporuší se původní tvar a odstraní se středová část ingotu, která sebou nese metalurgické vady [12].



**Obr. 5.6** Dērování plným trnem: 1 – dērovací trn; 2 - dērovaný polotovár; 3 - dolní kovadlo nebo pēchovací deska; 5 – dērovací kroužek; 6 – výdērek

### 5.2.3 Prodlužování na trnu

Jde o jeden ze způsobů kování dutých těles, při němž dochází k prodloužení materiálu ve směru podélné osy trnu a za současného zmenšování tloušťky stěn. Trn mývá úkos asi 10mm na metr délky. Co se týče úběru a délky záběru platí tyto zásady: [12]

Šířka kovadel označována B se volí jako:

$$B/D_e = 0,5 \text{ až } 0,7. \quad (12)$$

Kde:

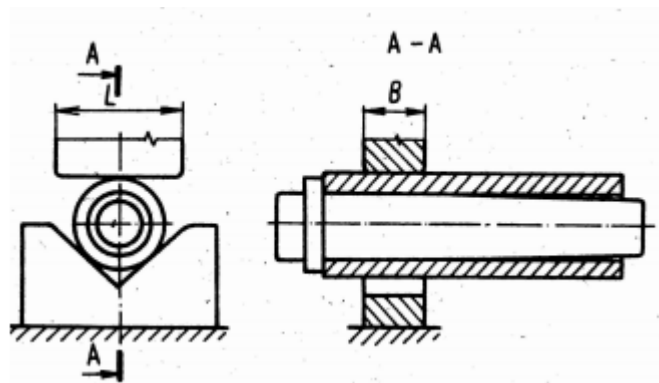
$D_e$ ... vnější průměr prodlužovaného tělesa

Průměr trnu značící  $d$  se stanoví podle průměru otvoru  $D_i$  takto:

$$d = (0,9 \text{ až } 0,95) D_i \quad (13)$$

Postup prodlužování na trnu:

Vyděrovaný předkovek se nasadí na trn mírně kuželovitého tvaru a prodlužuje se mezi kovádky. Prodlužovací trn zde plní funkci tuhé výplně, která rozčleňuje pásmo deformace na dvě dílčí oblasti mezi kovádky a trnem (viz. Obr. 5.7). [12]



Obr. 5.7 Prodlužování na trn

### 5.3 Výpočet velikosti deformace a síly

#### 5.3.1 Výpočet deformační síly a práce při kování

Velikost deformační síly je dán součinem deformačního odporu a průmětu plochy polotovaru do roviny kolmé ke směru působící síly.

$$F = k_0 * S \quad (14)$$

$$k_0 = k_p * m \quad (15)$$

Kde:

$k_o$  ...skutečný deformační odpor [MPa]

$k_p$  ...základní (přirozený) deformační odpor [MPa]

$S$  ... plocha styku s kovádkou [mm<sup>2</sup>]

$m$  ... koeficient závislý na způsobu tváření, tvaru a rozměrech a na tření

### 5.3.2 Stupeň deformace a prokování

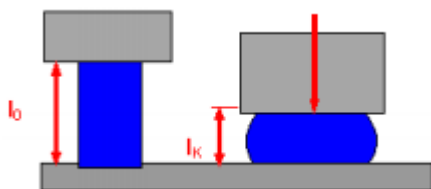
Ingot odlitý do kokil, nemá stejnorodou krystalickou strukturu. Při tváření za tepla se tvar primárních krystalů mění a dojde ke vzniku vláken. Nejprve se zrna protahují a tvoří tzv. texturu podobně jako při tváření za studena.

Vláknitost ovlivňuje především mechanické hodnoty jako je tažnost, pevnost a vrubová houževnatost. Hodnoty těchto mechanických vlastností jsou ve směru vláken jiné než napříč a mění se stupeň prokování a stupeň deformace.

U kotoučů, kroužků a dutých těles se počítá se stupněm prodloužování (označující  $K'$ ), jako poměr středního průřezu ingotu k průřezu po prodloužení, který by se za předpokladu, že postup bude: pěchování, prodloužení a znovu pěchování by se měl blížit nebo rovnat hodnotě 1 [13].

Stupeň deformace a prokování pro nejpoužívanější operace:

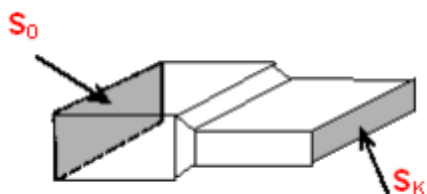
- Pěchování [13]



$$\varepsilon = (l_0 - l_k) / l_0 \cdot 100 \text{ [ \% ]} \quad (16)$$

$$P = \frac{S_p}{S_i}$$

- Prodlužování [13]



$$\varepsilon = (S_0 - S_K) / S_0 * 100 \text{ [ \% ]} \quad (17)$$

Kde:

$\varepsilon$  - stupeň deformace

$S_0$  – počáteční průřez

$S_K$  – konečný průřez

Pro výkovky u kterých je poslední kovářská operace prodlužování se stupeň prokování vypočítá ze vztahu:

$$PK = A^n * P^n * K \quad (18)$$

Kde:

$A$  – přechovací ekvivalent,  $A = 0,7$  až  $0,9$

$P$  – stupeň přechování ingotu,  $P = \frac{S_p}{S_i}$

$K$  – stupeň prodlužování ingotu,  $K = \frac{S_i}{S_v}$

$n$  – počet přechovacích operací.

Kde:

$S_p$  je příčný průřez napřehovaného ingotu,

$S_i$  - střední příčný průřez ingotu,

$S_v$  - plošný obsah největšího příčného průřezu výkovku.

## 6 Ohřev polotovaru

Účel ohřívání polotovaru spočívá ve zvýšení tvářitelnosti materiálu a snížení deformačního odporu čímž se zlepšuje jakost materiálu. Doba ohřevu kovací teploty by měla být co nejkratší, jinak může dojít k negativnímu narušení povrchové i vnitřní jakosti materiálu. Kratší doba ohřevu minimalizuje oduhličení, opal a hrubnutí zrna což jsou negativní faktory, které nechceme [14].

Vlastnosti mající vliv na požadovaný ohřev:

- Tepelná vodivost  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] – vyjadřuje přestup tepla z povrchu do jádra ohřívaného materiálu. Čím je vyšší, tím je přestup tepla rychlejší, tepelné napětí menší a doba ohřevu kratší.
- Měrná tepelná kapacita  $c$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] – představuje množství tepla potřebné ke zvýšení teploty na jednotku objemu ohřívaného kovu. Vykazující vysoké hodnoty mají za následek prodloužení doby ohřevu a tím i spotřebu energie.
- Hustota  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ] – vysoké hodnoty rovněž prodlužují dobu ohřevu a také spotřebu materiálu.
- Teplotní roztažnost  $\alpha$  [ $\text{K}^{-1}$ ] – její vysoké hodnoty způsobují zvětšení tepelného napětí v materiálu. Lze jej omezit snížením rychlosti ohřevu.

Kromě uvedených vlastností nelze opomenout další faktory jako je:

- Tvářecí teplota  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – pohybující se v intervalech, který je ohraničen horní a dolní kovací teplotou.

Horní kovací teplota má být nižší než kritická teplota růstu zrna, při kterém dochází k nežádoucímu zhrubnutí struktury.

K překročení dolní kovací teploty dochází k řádkovitosti sktruktury.

- Rychlost ohřevu [ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hod}^{-1}$ ] – je závislá na tepelné vodivosti materiálu a rozměrech ohřívaného tělesa.
- Doba ohřevu [h] – stanovuje se s ohledem na malou spotřebu energie, oduhličení, strukturální změny apod.

- Průvodní jevy ohřevu – vznik okují, který je ovlivněn dobou ohřevu, teplotou a atmosférovou pecí.

## 6.1 Kovací teplota

Teplota ohřevu nesmí být příliš vysoká, jinak může dojít k přehřátí oceli nebo dokonce k jejímu spálení. Kovací teploty se volí podle typu oceli. Teplota kování se volí tak, aby odpor oceli byl co nejmenší. Je třeba se vyvarovat zbytečně dlouhému ohřevu na vysokou teplotu kvůli riziku vzniku opalu oceli.

Při kování oceli za nízkých teplot dochází k jejímu zpevňování. Avšak při zpevňování dochází i křehnutí ocele. Proto kování za nízkých teplot nese rizika, jako jsou popraskání, vznik trhlin, odštípnutí a to zvláště u ocelí s vyšším obsahem uhlíku. Deformační zpevnění se proto odstraňuje žiháním, při kterém dochází k rekrystalizaci oceli a opětovnému změknutí [15].

## 6.2 Doba ohřevu

Ohřev materiálu by měl být takový, aby se dosáhlo co nejmenšího tepelného pnutí, rovnoměrného prohřátí a tvářecí teploty. Největší vlivy na dobu ohřevu materiálu jsou: tloušťka polotovaru, tepelná vodivost a rychlost ohřevu. Zejména rychlost ohřevu je nejvíce závislá na typu pece. Pro ohřev se používají:

- Komorové pece
- Karuselové pece [15].

## 6.3 Vliv teploty na deformaci

Při tváření za studena nastává díky vlivům různého směru kluzových rovin nerovnoměrná deformace způsobující zpevnění kovu. Zrna u výchozího materiálu (obr. 6.1) se vlivem tváření prodlužují ve směru největšího přemístování kovu a vytvářejí texturu. Bude-li materiál ohříván na určitou teplotu, jeho atomy se budou snažit přejít do rovnovážného stavu. Vnitřní pnutí se zmenší, deformace mřížky se vyrovná, tvar a rozměry deformovaných zrn však zůstanou nezměněny. Nastává zotavení obr. 6.2, které je závislé na čase a především teplotě. Další zvýšení teploty způsobí rekrystalizaci [15].





**Obr. 6.1** Zrna před tvářením [15]



**Obr. 6.2** Zrna po tváření [15]

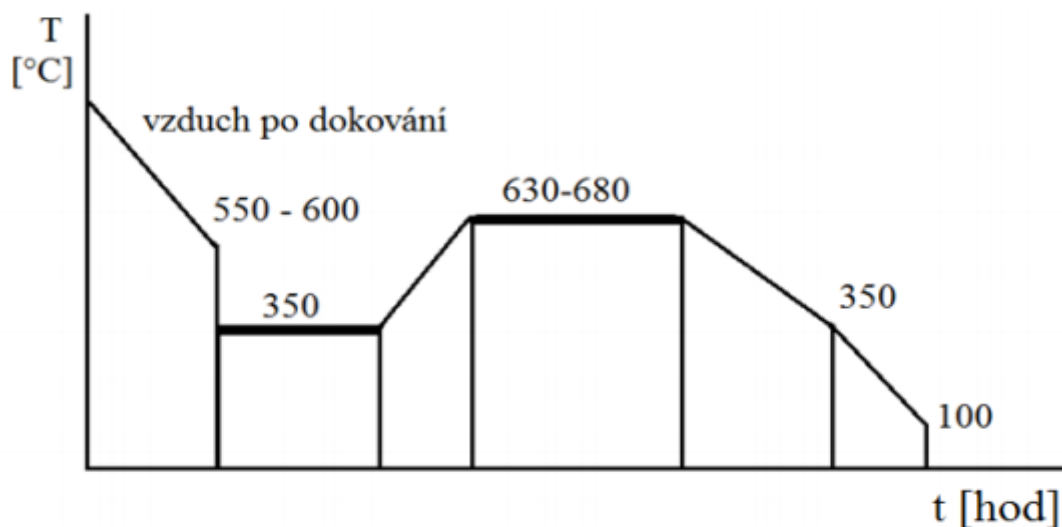
#### **6.4 Způsob ochlazování z dokovacích teplot**

Tepelné zpracování po dokování se používá k zabránění vzniku pnutí po kování při ochlazování, jak uvádí technická instrukce. Také pak na odstranění vodíku ve výkovku. Technická instrukce obsahuje několik režimů, a sice od volného vychlazování až po dva ohřevy na teplotu austenitizace a následné popouštění. Režimy zpracování závisí na rozměrech výkovků a jeho chemickém složení. Nejčastěji používané režimy jsou režim T2A (obr. 6.3) a T3A (obr. 6.4) používající se na ošetření výkovků typu desek a dutých těles po kování [16].

##### **➤ T2A**

Je základní režim pro tepelné zpracování po kování pro všechny typy oceli, které splňují požadavky na obsah vodíku. Účelem zde je snížení transformačních, tepelných a deformačních pnutí ve výkovcích a zároveň snížit v něm vodík.

Výkovky různých tloušťek se vychlazují volně v závětrí až do povrchové teploty 550 -600°C, následně se výkovky vkládají do předehřáté pece a podle ekvivalentních rozměrů se určují délky prodlev v dané teplotě. Po výdrži na teplotě se dojde k teplotě předepsané 630 -680°C s danou výdrží. Nakonec se výkovky vychlazují na vzduchu [16].

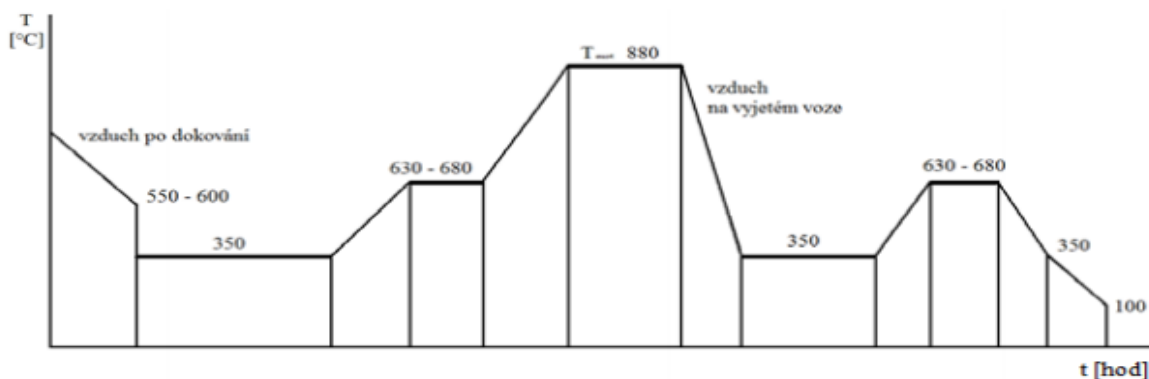


**Obr. 6.3** Režim T2A [16]

#### ➤ T3A

Náročnější režim, jehož součástí je už austenitizace. Aplikuje se v případech, kdy je požadováno provedení zkoušky ultrazvukem, před provedením jakostního tepelného zpracování. Faktory omezující tento režim jsou shodné s režimem T2A.

Výkovky všech tloušťek se vychlazují volně v závětrí po kování do dosažení povrchové teploty 550 - 600  $^{\circ}\text{C}$ . Následně se vkládají do předeřtuté pece a podle ekvivalentních rozměrů se určují délky prodlev v dané teplotě. Po výdrži na teplotě se postupně najíždí na austenitizační teplotu ( $A_{c3} + 50 - 150^{\circ}\text{C}$ ). Ta by neměla být nižší, než bude teplota austenitizace při jakostním tepelném zpracování. Ochlazování výkovku z teploty austenitizace je prováděno na vzduchu na vyjetém voze. Ukončení řízeného vychlazování na vzduchu je při teplotě 350 - 400  $^{\circ}\text{C}$ , potom je ohřev na teplotu 630 - 680  $^{\circ}\text{C}$  a vychlazení [15].



**Obr. 6.4** režim T3A [16]

## 6.5 Jakostní tepelné zpracování

Po poslední tvářecí operaci se kovaný materiál dostává obvykle na úsek jakostního tepelného zpracování a to za účelem dalších kroků, nezbytné k normalizaci zrna a k dosažení požadovaných vlastností. Tento úsek zpracování je možné rozdělit na dvě části, a sice úsek kalírny a úsek žíhárny.

V úseku kalírny se provádí jakostní tepelné zpracování s překrystalizací a úsek žíhárny slouží k operacím popouštěcí za účelem snížení vnitřních napětí.

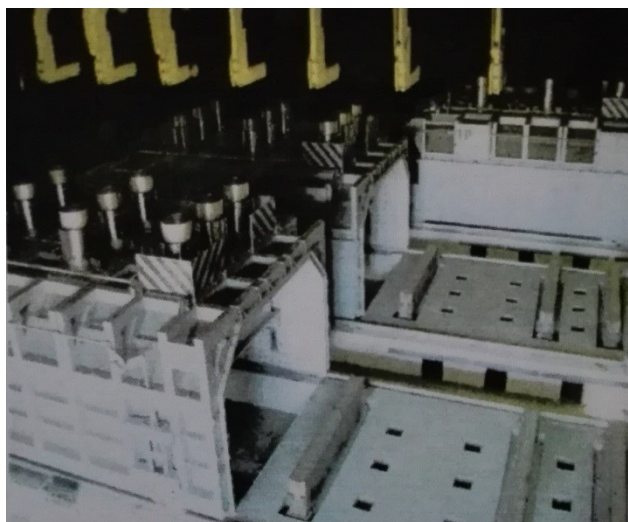
V kalírně se výkovek ošetřuje speciálními vyhlazovacími režimy. Důvod je intersticiální vodík představující prvek s poloměrem menším, než jsou meziatomové mezery matrice. Při chladnutí výkovku vlivem aktivační energie, se intersticiální vodík soustřeďuje kolem osy tělesa z důvodu lepší rozpustnosti v železe gama a po překrystalizaci by mohl způsobit mikrotrhliny vlivem zvýšeného napětí v mřížce. Na základě obsahu vodíku pak metalurg rozhodne, zda je možno výkovek dochlazovat na volném vzduchu, držet v teple a pod poklopem, nebo použít řízené vychlazování [16].

### Vychlazení na vzduchu:

Používá se u ocelí, u kterých nehrozí nebezpečí vzniku mikrotrhlin a u kterých není překročen obsah vodíku. Ochlazováním na vzduchu je míněno ochlazování na klidném vzduchu, což omezí vliv nucené konvekce.

### Držení v teple a pod poklopem:

Používá se u středně legovaných ocelí, kde by vlivem rychlého ochlazení mohlo dojít k mikrotrhlinám v důsledku velkého napětí mezi zrny. Výkovky po dokování se ukládají do termokrytů, pod poklop či do nevytápěné pece. Držení v teple u středně legovaných ocelí se provádí při teplotě 300°C. oceli více legované se vychlazují do teploty 200°C.



**Obr. 6.5** Stacionární termokryt

#### Řízené vychlazování:

Řízené vychlazování se používá u vysoce legovaných ocelí, kde je velké riziko vzniku mikrotrhlin. Také se hlavně provádí při zvýšeném množství intersticiálního vodíku a to u všech jakostí oceli.



**Obr. 6.6** Řízené vychlazování

## 7 Metody zkoušení výkovků

Jedná se o tzv. nedestruktivní zkoušení materiálu. Mezi takové metody patří: [17]

- Metoda vířivých proudů
- Magnetické zkoušení
- Kapilární zkoušení
- Radiografické zkoušení
- Ultrazvukové zkoušení
- Vizuální zkoušení

### 7.1 Magnetické zkoušení

Magnetické zkoušky popisují chování magnetických siločar na povrchu materiálu. Lze si je představit jako uzavřené křivky mezi dvěma pólovými nástavci. Když dojde k přerušení těchto siločar např. trhlinou, dojde ke změně jejich směru a to tak, že siločáry obcházejí překážku a tuto změnu můžeme pozorovat pomocí detekčních prostředků. Z tohoto tvrzení vyplývá, že princip této zkoušky spočívá ve zjištění defektů typu trhlin a svarů na povrchu materiálu, které jsou magnetické. Nejvíce používanou metodou je metoda bíločerná nebo fluorescenční.

Bíločerná metoda - se používá hlavně při kontrole svarů. Princip spočívá v nastříkání bílé barvy jeho okolí a po zaschnutí se nanese černý kovový prášek za současného zmagnetování. Defekty tak lze zvýrazněně vidět nahromaděným černým práškem.

Metoda fluorescenční - používá roztok magnetického prášku, který je fluorescenční. Případné defekty pak lze vidět pod ultrafialovým světlem. Tato metoda vyžaduje prostředí s minimálním přísunem denního světla [17].

### 7.2 Kapilární zkoušení

Kapilární zkoušení se používá k zviditelnění povrchových vad a to převážně u nemagnetických materiálů. Využívá se kapilárních sil, které umožňují vniknutí vhodných indikačních kapalin do vad. Na povrch se nanáší látka (prášek nebo schnoucí suspenze), nasávající indikační látku ze štěrbin a změnou barvy se identifikuje povrchová vada.

Indikační látky: vápenné mléko petrolej, malířská hlína apod.

Postup spočívá natřením zkoušeného povrchu nebo ponořením do indikační kapaliny. Po čase se povrch opláche, osuší a posype detekční látkou, aby došlo ke zviditelnění vady.

### 7.3 Zkouška ultrazvukem

Ultrazvuk je akustické vlnění s frekvencí ležící nad hranicí sluchu lidského ucha. Při zkouškách ultrazvukem se používá ultrazvukové vlny o frekvenci 1 až 10 MHz. Zkouška se zaměřuje například na zjišťování plošných vad a trhlin, zjišťování stěn a větších objemových vad materiálu.

Zdrojem ultrazvukových vln jsou destičky piezoelektrických krystalů (např. křemene). Při zapojení střídavého el. napětí destičky rozkmitají jeho kmitočtem. Od nich se pak šíří podélné ultrazvukové vlny [17].



**Obr. 7.1** sada pro zkoušku ultrazvukem

Základ většiny měření tvoří ultrazvuková energie procházející materiálem. Aby se zjistilo průchodu ultrazvukových vln mezi ultrazvukovou sondou, a materiálem je třeba použít vhodnou přechodovou látku jako je voda, olej nebo vazelína, aby se odstranila vzduchová vrstva, bránící k dokonalé akustické vazbě. A na vazbě to vše stojí.

### 7.4 Radiografické zkoušení

Díky této zkoušce lze získat a vidět tak vnitřní vady materiálu a to jak objemové tak i plošné. Metoda se obvykle užívá při kontrole svarů, odlitků a to i tvarově složitých, dále například v elektrotechnickém a stavebním průmyslu apod. Je jednou z nejdůležitějších metod při kontrole zařízení jako například tlakové nádoby, v leteckém nebo petrochemickém průmyslu [17].

## 7.5 Metoda vířivých proudů

Užívá ve zkoušení elektricky vodivých materiálů. Nejčastěji se používá při kontrole hutních polotovarů, při provozních kontrolách trubkových tepelných výměníků, v automobilovém průmyslu, v letectví. Řadí se mezi poruchové metody. Kromě hledání poruchových vad, lze s ní hledat také vady v určité hloubce pod povrchem (10 až 25mm dle materiálu). Také měřit např. tloušťku nevodivých povlaků. Hlavní plusy této metody je její rychlost zkoušení, snadná automatizovatelnost a hodnocení [17].

## 7.6 Vizuální zkoušení

Metoda je zaměřena na zjišťování a hodnocení stavu povrchů výrobku či součásti pouhým zrakem či za pomoci přístrojů. Metoda se užívá při hledání vad, jako jsou trhliny, povrchové póry, zápaly, dále zjišťujeme např. tvarové odchylky (lineární přesazení, převýšení kořene svaru, přesazení forem u odlitku...)

Je používána za základní nedestruktivní zkoušku, která by nesměla nikdy chybět [17].



**Obr. 7.2** vysokorychlostní kamera



**Obr. 7.3** Luxmetr

## 8 Experimentální část

V experimentální části jsem prováděl pēchovací zkoušku za tepla. Vzorky mnou použité při experimentu jsou znázornēny na obrázku níže (Obr. 8.1). Všechny vzorky prošli pēchováním, lišili se však stupněm teploty. Můj úkol spočíval v provedení již zmiňované zkoušky, kdy byly poté vzorky rozříznuty na několik částí, putující k dalšímu zpracování. Další z úkolů spočíval ve stanovení mikrostruktury vzorků pomocí metalografického výbrusu, porovnání mikrostruktur a stanovení velikosti zrna. V neposlední řadě jsem provedl výpočty deformací, stupně prokování a popis průběhu deformace pēchovaného tělesa.



Obr. 8.1 Výchozí vzorky

### 8.1 Postup pēchovací zkoušky

Postup pēchovací zkoušky je popsán dle normy: ČSN 42 0426. Podstata metody zkoušení spočívá v pēchování tělesa ve směru jedné podélné osy do předepsaného stupně deformace.

Provedení zkoušky:

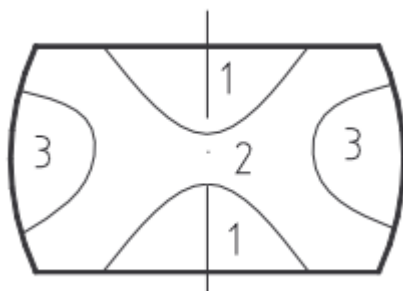
- Pēchování za studena se provádí při teplotě  $(20^{+15}_{-20})$  °C.
- Pēchování za tepla se přípustná a počáteční teplota stanovuje v normách ~~RVHP~~ na hutní výrobky.
- Zkouškou se zjišťuje schopnost materiálu k plastickým deformacím a také pomocí ní se zjišťují povrchové a podpovrchové vady.



- Zkouška pēchováním je prováděna plynulým zatěžováním na lisech nebo rázovým zatěžováním na bucharech až do dosažení výšky vzorku  $h_1$ , vypočtené na základě poměrné deformace.
- Velikosti poměrné deformace při pēchování jsou uvedeny v normách na hutní výrobky.
- Doporučené hodnoty deformací zkušebních těles z ocelí jsou 50, 60 a 75 %.

#### Průběh deformace pēchovaného tělesa

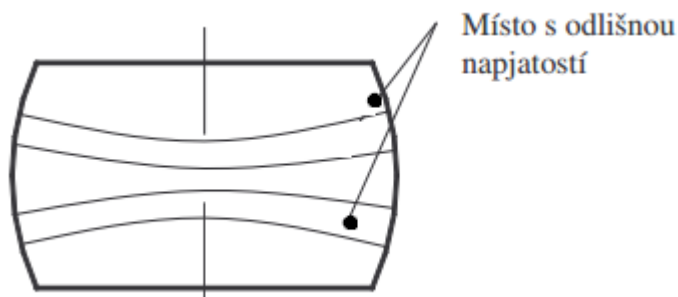
Průběh deformace pēchovaného tělesa je v jeho místech velmi odlišný. Tuto odlišnost je možno rozdělit podle stupňů deformace do tří oblastí vyskytující se v jednotlivých místech tělesa (viz. Obr. 8.2).



**Obr. 8.2** Oblasti s různou deformací

- Oblast 1: pásno přilnutí  
Vytvoří se uprostřed pod plochou, kde na těleso působí deformační síla a to jak na horní tak i dolní straně. Tvar nabývá kuželovitého tvaru a jsou v ní minimální deformace.
- Oblast 2: pásno skluzu  
Lze jej vidět ve střední části tělesa a prostupuje až k vnějšímu okraji. Vyznačuje se smykovým napětím a velkou deformací.
- Oblast 3: Nabývá tvaru prstence eliptického průřezu a je možné ji spatřit po obvodu. V této oblasti působí střední tahové napětí, které narůstá směrem k vnějšku.

Deformace v tělese závisí nejen na průměru a výšce zkušební vzorku, ale také na stupni petchování. Napjatost v tělese je v závislosti na petchování proměnlivá resp. se mění a není v celém objemu stejná. Odlišnost v napjatosti může být jiná až do 50% v jednotlivých místech (viz. Obr. 8.3). [12]



**Obr. 8.3** Místa s odlišnou napjatostí

## 8.2 Postup metalografického výbrusu

Nařezané vzorky jsem prvně bakelitoval na stroji „Strues labo přes 1“. K tomu mi sloužila směs „Multifast Green“. Jednotlivé vzorky jsem bakelitoval při teplotě 180°C po dobu 6 minut. Následně jsem prováděl jejich ochlazování rovněž po dobu 6 minut. Teprve potom jsem přistoupil k samotnému broušení. Brousil jsem na brusných papírech od nejhrubších po nejjemnější. Při ručním broušení se obvykle vzorek drží jedním směrem. Při přechodu na brusný papír s menší drsností, jsem vzorek opláchnul pod tekoucí vodou, následně lihem a osušil horkým vzduchem. Pak jsem otočené vzorky o 90° brousil ve směru kolmém k předcházejícímu směru. Kvalitní oplachování vzorku je nutné, aby nedošlo k znehodnocení jemnějšího papíru uvolněnými zrnky hrubšího brusiva z předchozího papíru. Broušení se provádí tak dlouho, dokud zcela nezmizí drážky reprezentující předchozí směr broušení. Poté opět opláchneme a přejdeme na jemnější papír.

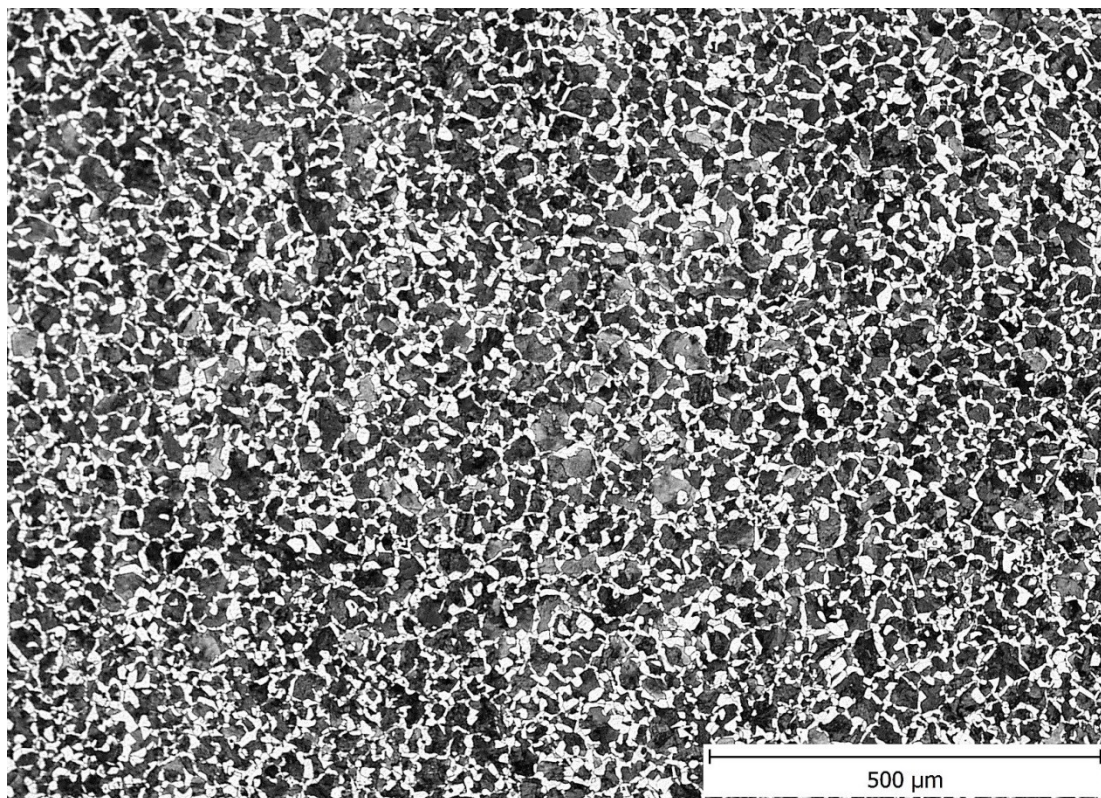
Broušení jsem prováděl na brusných strojích metasinex, které chladí vzorky při broušení tekoucí vodou. Leštění jsem prováděl na leštících kotoučových strojích, kdy se přítlakem vzorku na rotující leštící kotouč za pomoci leštícího média vyleští. Jako leštící medium byla použita tzv. hlinka. Leštěním jsem pohyboval vzorkem proti směru otáčení kotouče, dokud jsem nedosáhl zrcadlového lesku. Po leštění následovalo opět omytí vzorků vodou, lihem a osušením horkým vzduchem. Vyleštěné vzorky jsem poté naleptal 4% kyselinou dusičnou a celý proces leštění a naleptání jsem opakoval celkem 3x za účelem zlepšení viditelnosti mikrostruktury pod mikroskopem. Výsledné vzorky jsou na obr. 8.4.



**Obr. 8.4** vzorky po metalografickém výbrusu

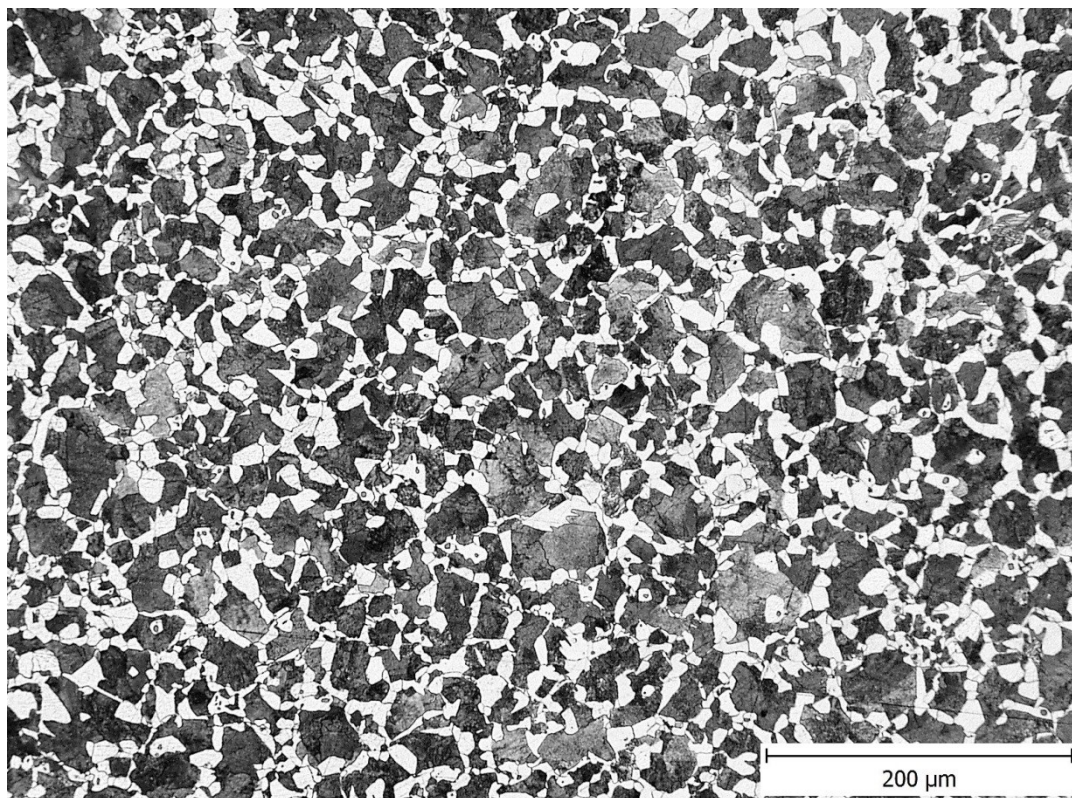
### 8.2.1 Výsledky struktur

Výsledné fotografie struktur ze vzorků jsou uvedeny na (obr. 8.5 až 8.14).

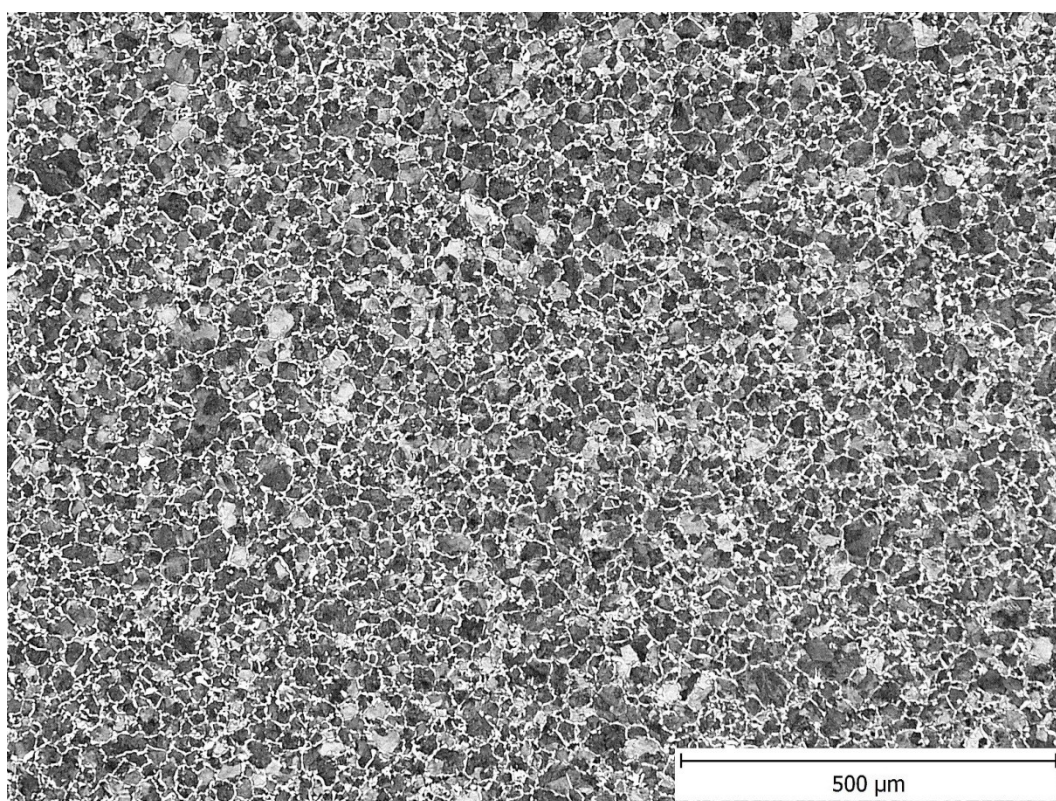


**Obr. 8.5** Fotografie výchozího vzorku (nedeformovaného) při 0°C, zvětšeno 100x



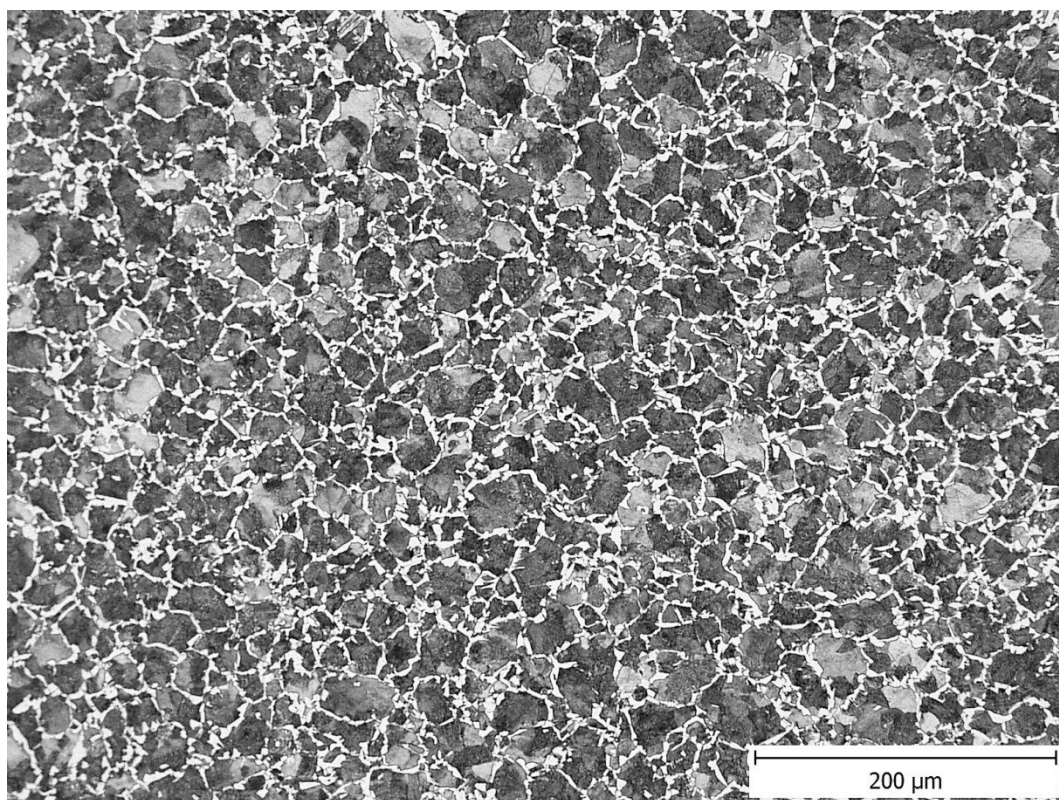


**Obr. 8.6** Fotografie výchozího vzorku (nedeformovaného) při 0°C, zvětšeno 200x

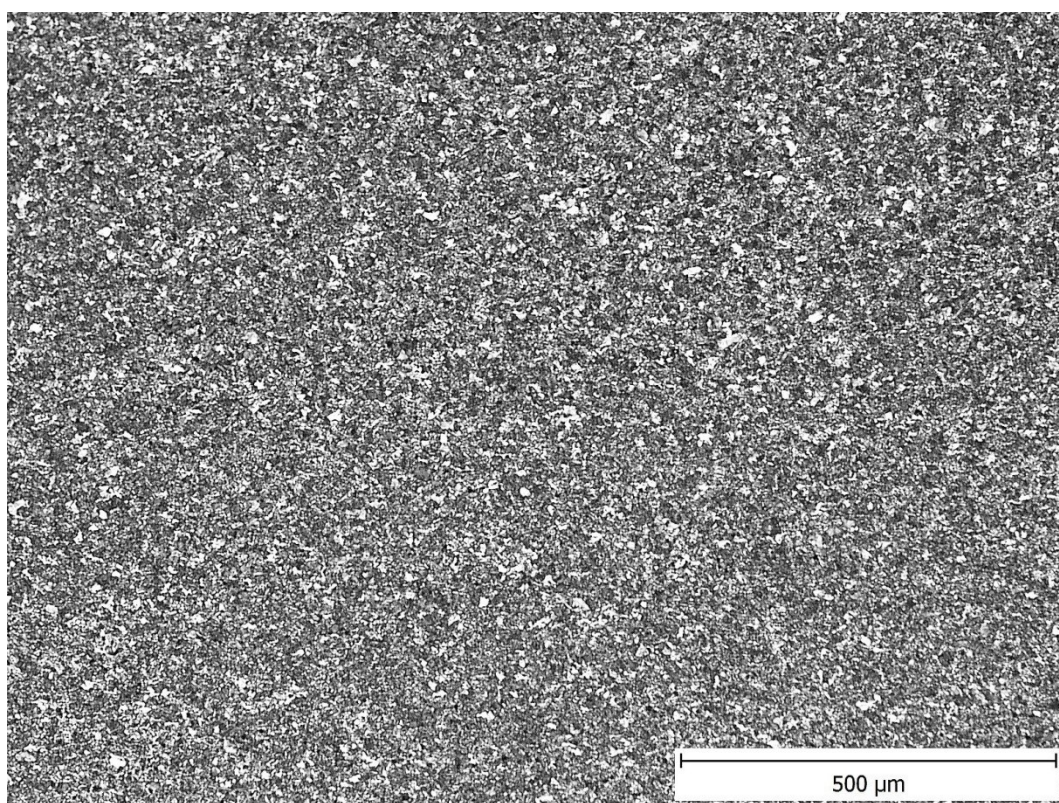


**Obr. 8.7** Fotografie pēchovaného vzorku č. 3 při 1075°C, zvětšeno 100x



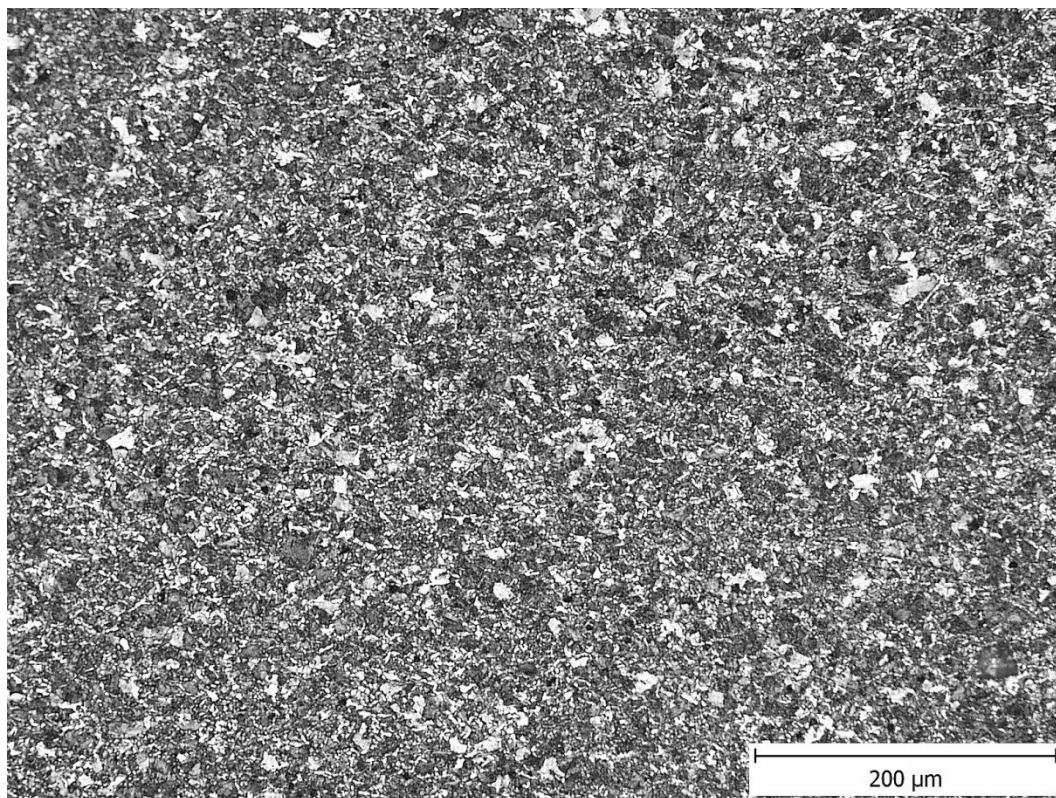


**Obr. 8.8** Fotografie pēchovaného vzorku č. 3 při 1075°C, zvětšeno 200x

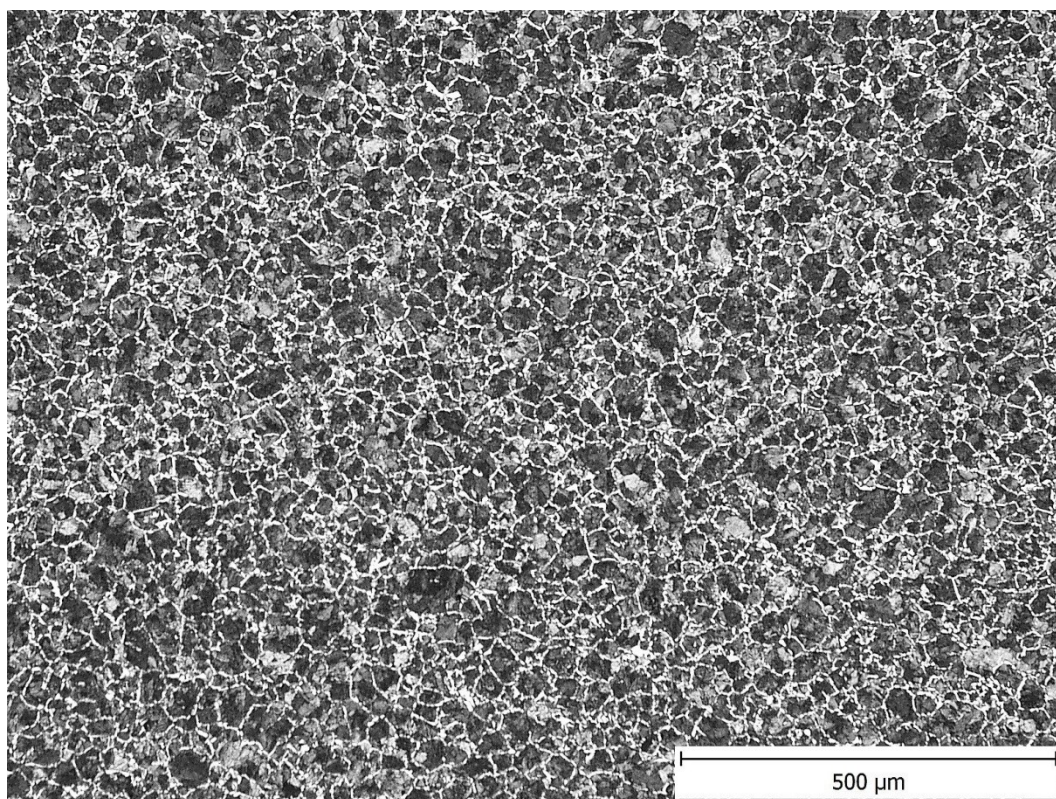


**Obr. 8.9** Fotografie tvářeného vzorku č. 4 při 1075°C, zvětšeno 100x



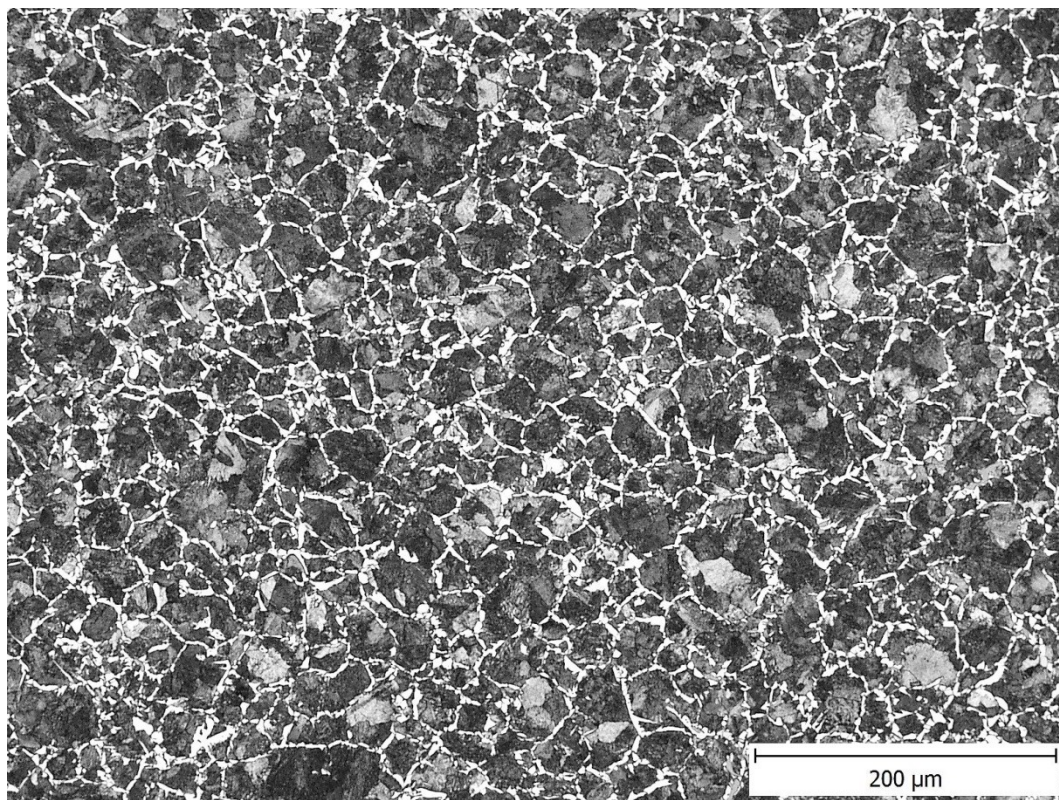


**Obr. 8.10** Fotografie vzorku č. 4 při 1075°C, zvětšeno 200x

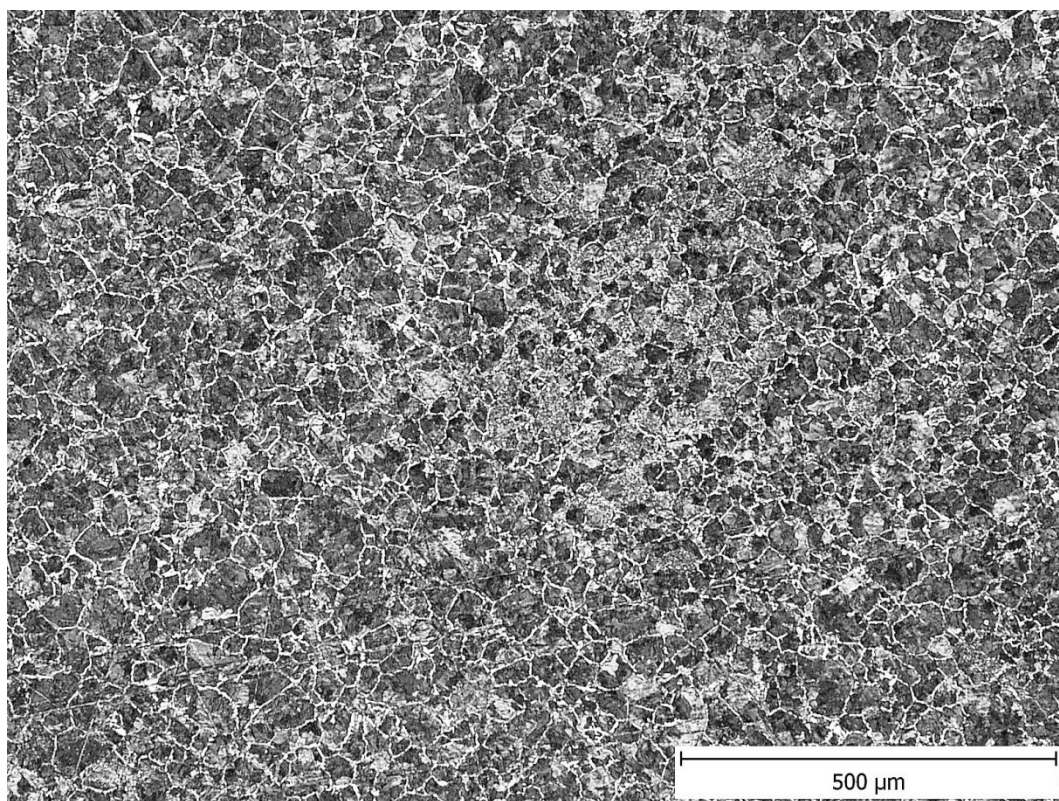


**Obr. 8.11** Fotografie vzorku č. 2 při 1150°C, zvětšeno 100x



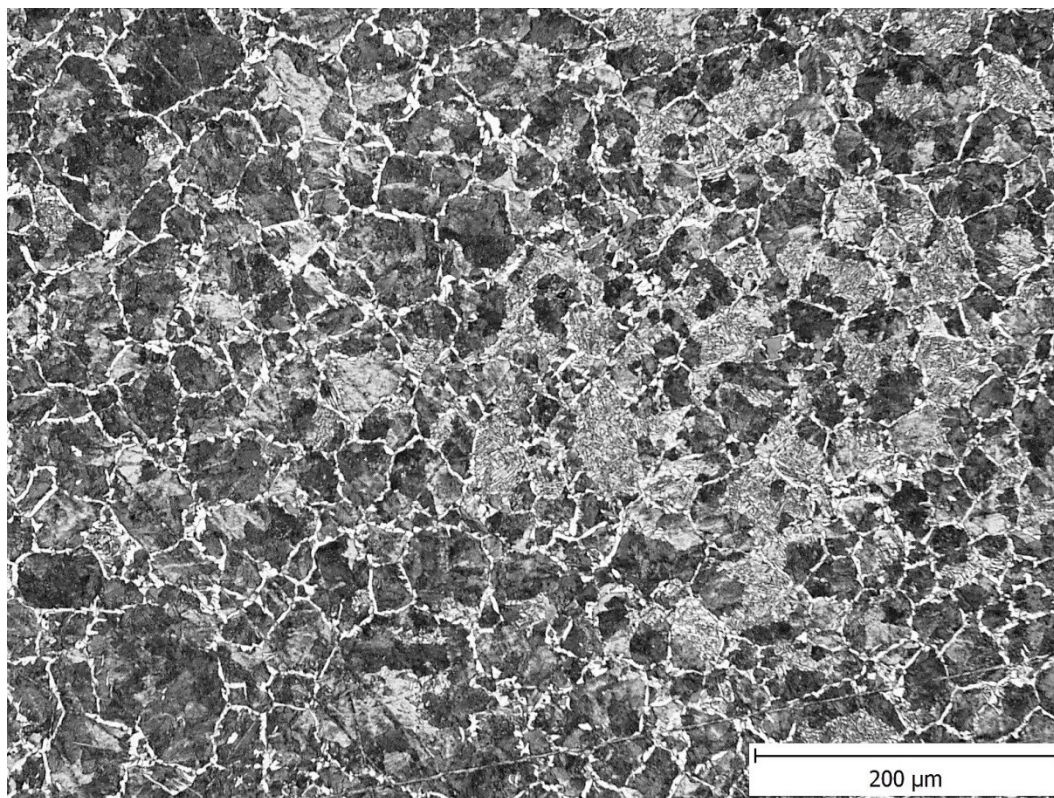


**Obr. 8.12** Fotografie vzorku č. 2 při 1150°C, zvětšeno 200x



**Obr. 8.13** Fotografie vzorku č. 1 při 1250°C, zvětšeno 100x





**Obr 8.14** Fotografie vzorku č. 1 při 1250°C, zvětšeno 200x

U těchto fotografií lze vidět různé složení struktur. Všechny vzorky byly vyfoceny pod dvěma zvětšeními, aby šlo okem snáze určit, o jaké struktury se jedná. Výchozí vzorek byl z oceli třídy 12, konkrétně 12 050. Jeho chemické složení a vlastnosti jsou zaznamenány v kapitole 3. Struktura vzorků vykazuje převážně perlitickou strukturu a feritické síťové po hranicích zrn. U vzorku (obr. 8.14) je možné spatřit martenzit z důvodu rychlejšího ochlazování.

### 8.2.2 Určení velikosti zrna

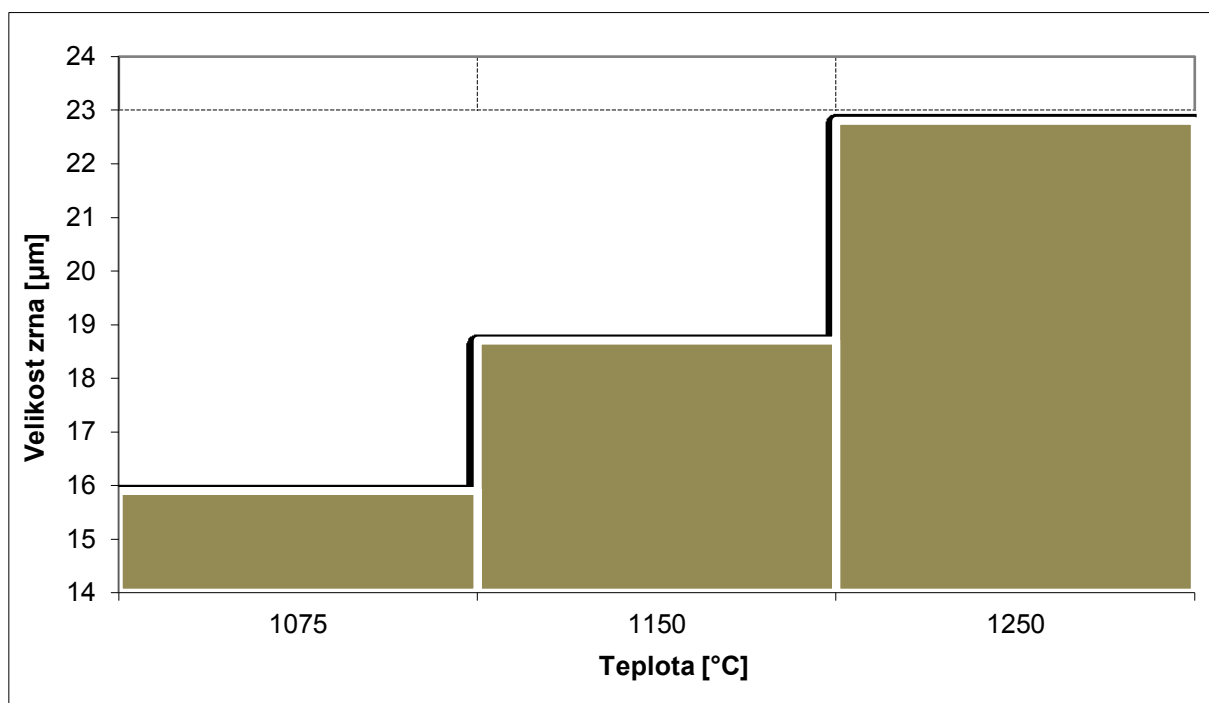
Na základě vyhodnocení některých struktur vzorků, jsem prováděl měření úsečkovou metodou průměrné délky zachování úseku. Výsledné hodnoty jsem přiřazoval k odpovídajícímu číslu velikosti zrna dle norem ČSN EN ISO 643. Velikost zrn vzorků je možné vidět níže (viz tab. 8.1) a následně jsem jej vyobrazil na grafu v závislosti zrna na teplotě (viz Obr. 8.21). Jedná se o tři vzorky, mající stejné výchozí těleso (váleček).



**Tab. 8.1** Velikost zrna

Vzorek	Teplota °C	Střední hodnota	Velikost zrna G
Vzorek č. 1	1075	15,9	G9
Vzorek č. 2	1150	18,7	G8
Vzorek č. 3	1250	22,8	G8

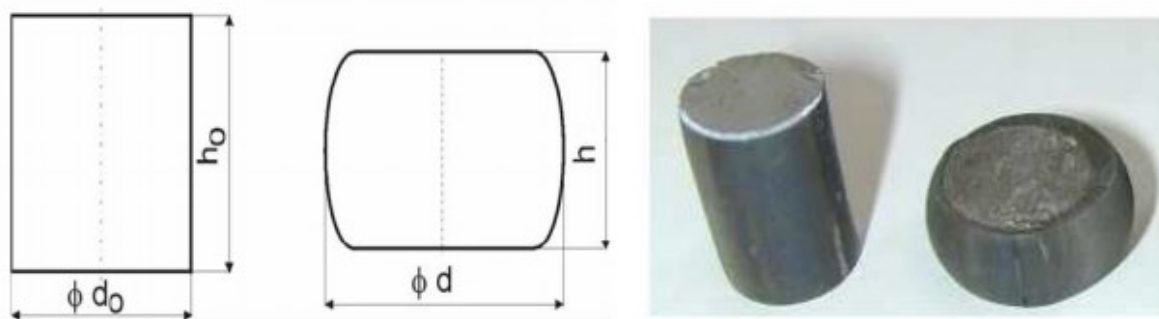
Obrázek 8.15 ukazuje grafické znázornění velikosti zrna tří vzorků závislé na teplotě. Je vidět, že s rostoucí teplotou velikost zrna stoupá. U vzorku č. 4 nebylo zcela možné na základě fotek struktur spočítat velikost zrn. Struktura zrna je příliš jemnozrná.



**Obr. 8.15** Graf závislosti velikosti zrn na teplotě

## 9 Tvar a matematický popis vzorků

Nejčastěji jde o těleso válcového tvaru s počáteční výškou  $h_0$  a průměrem  $d_0$ . Poměr mezi výškou a průměrem nedeformovaného tělesa  $D_r$  je dodržován dle obrázku 9.1 tak aby nedošlo k ohnutí při jeho přechování.



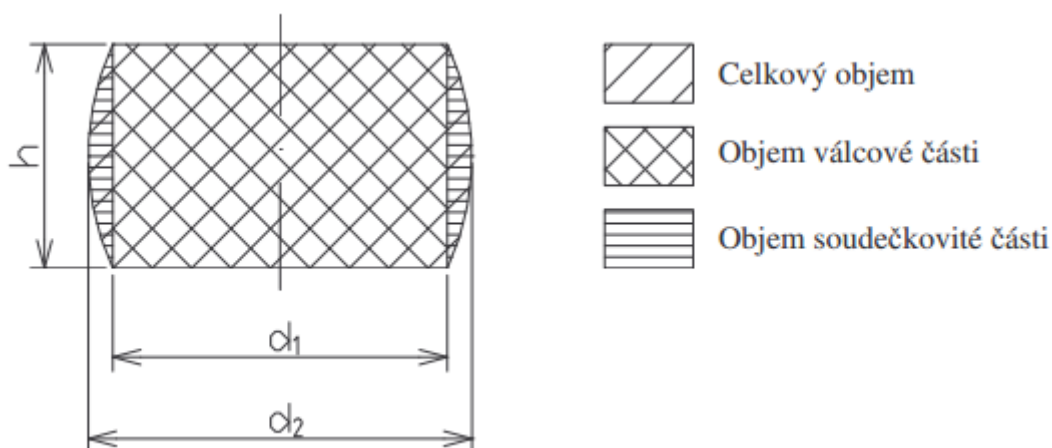
**Obr. 9.1** Rozměry zkušebního tělesa před a po zkoušce

Poměr mezi výškou a průměrem nedeformovaného tělesa  $D_r$  je vyjádřen vztahem:

$$D_r = h_0 / d_0 [-] \quad (19)$$

Hodnota poměru polotovaru má ležet v intervalu 1,25 až 2,5.

Zkušební vzorek po přechovací zkoušce nabývá tvaru soudečkovitého tělesa (obr. 9.2). To je způsobeno tzv. nerovnoměrnou deformací. Proto určujeme koeficient soudečkovitosti  $B_s$ , charakterizující stupeň přetvoření tělesa. S poměrným stlačením výšky  $h_0$ , se koeficient mění a je závislý na štíhlosti zkušebního tělesa. Koeficient soudečkovitosti  $B_s$ , se pohybuje v intervalu 0 až 1. [12]



**Obr. 9.2** Soudečkovitý tvar tělesa a jeho objemové části [12]

Soudečkovitost vypočítám pomocí vztahu:

$$S = V_c - V_v / V_c * 100 [-] \quad (20)$$

$$V_c = \frac{\pi d_0^2}{4} * h_0 \quad (21)$$

$$V_v = \frac{\pi d_1^2}{4} * h_1 \quad (22)$$

Kde:

$V_c$  ... Objem výchozího tělesa,

$V_v$  ... Objem válcové části výkovku,

$d_0, d_1$  ... počáteční průměr, průměr po přechování,

$h_0, h_1$  ... počáteční výška, výška po přechování.

Velikost přetvoření je v tomto případě definována pomocí tzv. poměrného stlačení označující se jako „ $\varepsilon$ “, nebo jako skutečným (logaritmickým) přetvořením „ $\varphi$ “ dle vztahů:

$$\varepsilon = h_0 - h_1 / h_0 [-] \quad (23)$$

$$\varphi = \ln h_0 / h_1 [-] \quad (24)$$

kde:

$\varepsilon$  ... poměrné přetvoření [-]

$\varphi$  ... logaritmické přetvoření [-]

$h_0$  ... počáteční výška zkoušeného tělesa [mm]

$h$  ... konečná výška zkoušeného tělesa [mm]

Výpočet stupně přechování:

$$P = \frac{S_1}{S_0} = \frac{h_0}{h_1} \quad (25)$$

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \quad (26)$$

$$d_s = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (27)$$

$$S_1 = \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (28)$$

Kde:

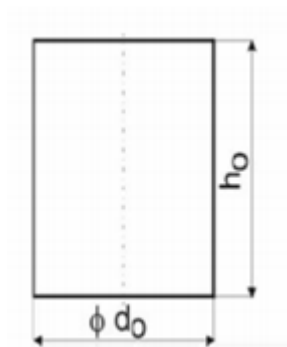
$S_0, S_1$  ... průřez před a po přechování,

$d_s, d_0$  ... střední průměr a počáteční průměr,

$h_0, h_1$  ... výška před a po přechování.

## 9.1 Numerické výpočty

Výchozím polotovarem byly vzorky z uhlíkové oceli ocel 12 050. Tvar vzorku lze vidět na obr. níže (Obr. 9.3).



**Obr. 9.3** Schéma rozměru výchozího vzorku

Poměr mezi výškou a průměrem nedeformovaného tělesa se vypočítá jako:

$$D_r = h_0 / d_0 [-] \quad (19)$$

Kde:

$h_0$  ... počáteční výška [mm]

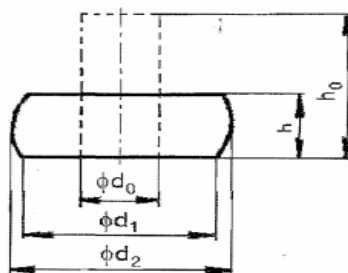
$d_0$  ... počáteční průměr [mm]

Tabulka 9.1 ukazuje naměřené hodnoty vzorků a výslednou hodnotu poměru mezi výškou a průměrem. Hodnota poměru má ležet v intervalu od 1,25 až do 2,5. Je vidět, že vzorek tuto podmínku splňuje.

**Tab. 9.1** Hodnoty výchozího (nedeformovaného) tělesa pro vzorky 1-4.

Vzorek	Výška $h_0$ [mm]	Průměr $d_0$ [mm]	Poměr výšky a prům. $D_r$ [-]
Výchozí	28,56	19,96	1,43

Další z výpočtů mnou prováděných byly výpočty deformace, a to deformace poměrné a logaritmické a také výpočet soudečkovitosti (obr. 9.4 schéma soudečkovitosti). Užití vzorce pro výpočty jsou z kapitoly 9.



**Obr. 9.4** Schéma soudečkovitosti

Celkem šlo o 4 vzorky, jejíž naměřené hodnoty jsou vidět v tabulce 9.3.

**Tab. 9.3** Naměřené hodnoty vzorků

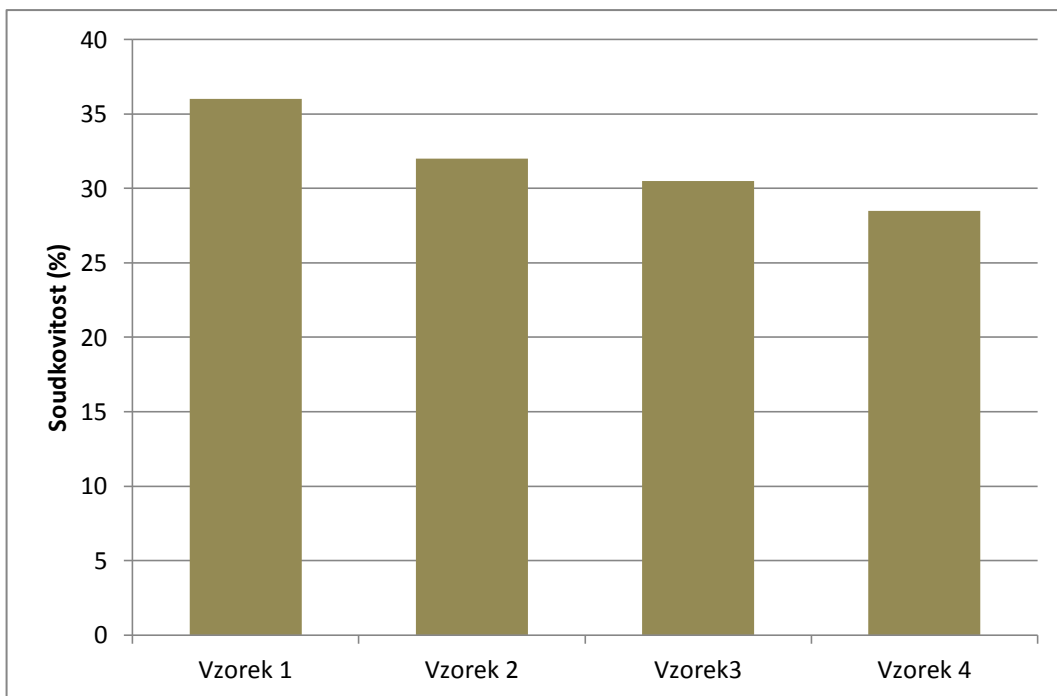
Vzorek	Teplota °C	$h_1$ [mm]	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]
Vzorek č. 1	1250	12,48	24,13	26,82
Vzorek č. 2	1150	12,81	24,41	26,98
Vzorek č. 3	1075	12,68	24,95	27,13
Vzorek č. 4	1075	6,78	34,63	38,18

Následující tabulka 9.4 představuje výsledky hodnot jednotlivých vzorků.

Závěr:

**Tab. 9.4** Tabulka výsledků

Vzorek	$V_c$ [mm <sup>3</sup> ]	$V_v$ [mm <sup>3</sup> ]	S %	$\varepsilon$ [-]	$\varphi$ [-]	P
Vzorek č. 1	8932	6689	36	0,563	0,82	1,62
Vzorek č. 2	9832	5991	32	0,551	0,81	1,65
Vzorek č. 3	8932	6201	30,5	0,556	0,80	1,69
Vzorek č. 4	8932	6382	28,5	0,763	1,44	3,32



**Obr. 9.5** Graf závislosti soudčkovitosti na teplotě

Vzorek č. 1 vykazuje soudčkovitost 36%.

Vzorek č. 2 vykazuje soudčkovitosti 32%.

Vzorek č. 3 vykazuje soudčkovitost 30,5%.

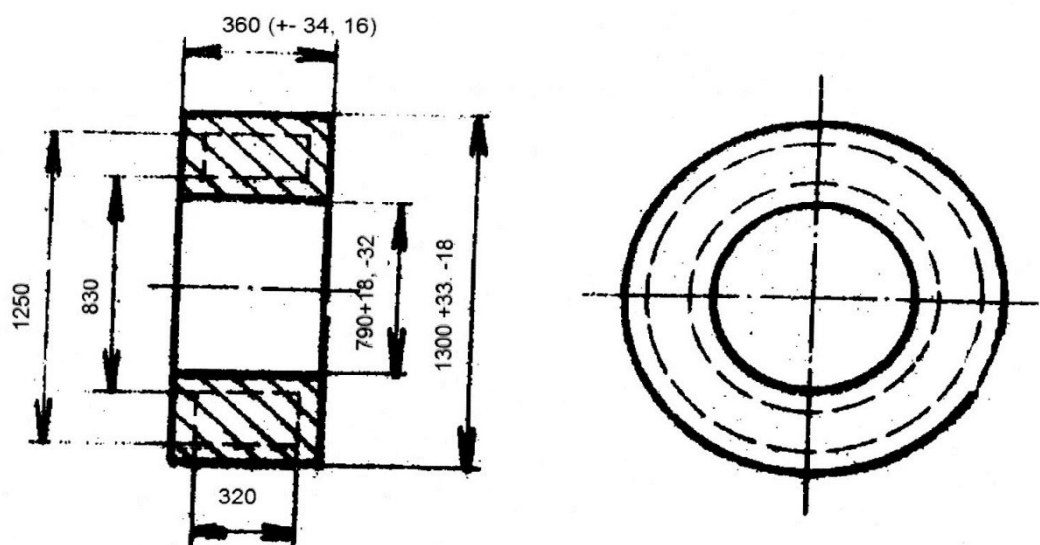
Vzorek č. 4 vykazuje soudčkovitost 28,5%.

Deformace uvnitř vzorků na základě zvětšující se deformace, se zrovnoměnila. Jak ukazuje graf 9.5. S klesající teplotou klesá soudkovitost. A lze říci, že teplota má vliv na soudkovitost, jak se ukazuje vzorků 1 až 3.

Stupeň pčchování (označován P) vykazuje výraznou změnu u vzorku č. 4 oproti ostatním, neboť zde proběhla výrazně větší deformace vzorku, stejně tak co se týče výpočtu obou deformací.

## 10 Návrh technologického postupu kování kroužku

Jedná se o návrh technologického postupu kovaného výkovku kroužku z oceli dle ČSN 11 500. Tvar a rozměry výkovku je zobrazen na obr. 10.1.



Obr 10.1 Tvar a rozměry výkovku

Postup:

### a) Určení kovářských přídavků

Rozměry obrobenej součásti:

$$d = 1250 \text{ mm}, d_a = 830 \text{ mm}, h = 320 \text{ mm}$$

Přídavky na obrábění a mezní úchytky:

$$p_K = 52^{+31}_{-20} \text{ mm},$$

$$p_K = 52^{+20}_{-31} \text{ mm},$$

$$p_{kh} = 44^{+26}_{-16} \text{ mm}$$

Předběžné rozměry výkovku:

$$D = 1302^{+31}_{-20},$$

$$D_a = 788^{+20}_{-31},$$

$$H = 364^{+26}_{-16},$$

Jmenovité rozměry výkovku:

$$D = 1300^{+33}_{-18},$$

$$D_a = 790^{+18}_{-32},$$

$$H = 360^{+34}_{-16}$$

### **b) Určení hmotnosti ingotu**

Hmotnost ingotu představující výchozí polotovár se vypočítá dle vztahu:

$$G_i = G_v + G_o + G_{op} + G_{hl} + G_p \quad (26)$$

Kde:

$G_i$  ... hmotnost ingotu

$G_v$  ... teoretická hmotnost výkovku

$G_o$  ... hmotnost odseků

$G_{op}$  ... hmotnost ztracená opalem

$G_{hl}$  ... hmotnost odpadu od hlavy ingotu

$G_p$  ... hmotnost odpadu od paty ingotu

Hmotnost výkovku:

$$G_v = V \cdot \rho = (\pi \cdot 650^2 \cdot 360 \cdot 7,85 \cdot 10^3) - (\pi \cdot 395^2 \cdot 360 \cdot 7,85 \cdot 10^3) = \underline{2366\text{kg}}$$

Hmotnost odseků (v průměru 3% z  $G_v$ ):

$$G_o = \underline{71\text{kg}}$$

Hmotnost ztracená opalem:

Je rovna 2% hmotnosti ohříváního materiálu na první ohřev a na každý další ohřev 1,5%.

$$G_{op} = 48 + 35,5 + 35,5 = \underline{119\text{kg}}$$

Hmotnost odpadu od hlavy ingotu (pro ingot I 3,4):

$$G_{hl} = \underline{535\text{kg}}$$

Hmotnost odpadu od paty ingotu:

$$G_p = \underline{115\text{kg}}$$

Výsledná hmotnost ingotu:

$$G_i = 2366 + 71 + 119 + 535 + 115 = 3206 \text{ kg} = \underline{3,2\text{t}} \text{ (Ingot 8K 34)}$$



Po zjištění výsledné hmotnosti ingotu se přiřadí nejbližší vyšší ingot z vyráběného sortimentu. V tomto případě půjde o ingot I 3,4 o celkové hmotnosti 3,40t. Jehož hmotnost těla činí 2,750t, hmotnost hlavy 0,535t a hmotnost paty 0,115t. Směrné využití těla ingotu je 92%.

**c) Postup kování výkovku**

- Volba výchozího polotovaru:

Teoretická hmotnost výkovku:  $G_v = 2366\text{kg}$

Navržení ingotu pro výkovek:

Hmotnost výkovku:  $G_v = 2366\text{kg}$

Propal: 119kg (5% hmotnosti)

Ztráta děrováním: (zanedbatelná hmotnost)

Celkem: 2247kg

Navržený ingot: I 3,4

Hmotnost těla ingotu:  $G_{it} = 2750\text{kg}$

Využití těla ingotu: 92% tedy využitelná hmotnost těla ingotu je  $G_{it} = 2475\text{kg}$ .

- Postup kování:

I. operace:

Ohřev ingotu na teplotu HKT 1180°C.

Použité nářadí: kovádkla rovná, značící tyč, příložka, sekáč.

Z hlavy ingotu se vykove manipulační čep, ingot se poté překová na kruhový cegl o průměru asi 500 mm, oddělí se pata ingotu a z těla špalek o výšce 1535mm.

II. operace:

Příhřev na teplotu HKT 1180°C.

Použité nářadí: kovádkla rovná, děrovací trn, příložka.

Špalek se napěchuje na hrubou výšku kruhu, tj 365 mm a za pomoci plného trnu děrovat o průměru 180mm.

III. operace:

Přihřev na teplotu HKT 1180°C.

Použité nářadí: Plný kovací trn, kovářské stojany, kovádla úzká pro rozšiřování, kovádla plochá pro kování na výšku.

Vyděrovaný špalek se naková na kovacím trnu na hrubý vnější průměr kroužku, tj. průměr 1300 mm. Po výměně kovádel nakovat kroužek na konečnou výšku 360 mm a dokovat konečné rozměry. Kroužek poté vyrovnat.

- Kontrola stupně prokování:

Stupeň prokování PK určíme ze vztahu:

$$PK = A^n * P^n * K * \sqrt{P'} * \frac{S_p * H_p}{S * H} \quad (27)$$

Kde:

A ... pěchovací ekvivalent

P ... stupeň pěchování

n ... počet pěchovacích operací

K ... stupeň prodlužování

P' ... stupeň pěchování poslední pěchovací operace

S<sub>p</sub> ... výchozí tloušťka stěny

H<sub>p</sub> ... výška děrovaného kotouče

S ... konečná tloušťka stěny

H ... výška kroužku

Vzhledem k tomu, že do technologie kování není zařazeno pěchování ingotu na sférických pěchovacích deskách vychází při výpočtu:

$$A = 0,9; n = 1; P = 1$$

Operace prodlužování byla použita pouze při překování těla ingotu na jeho střední průměr, a proto se do výpočtu stupně prokování rovněž nezahrnuje, tj.

$$K = 1$$

Pěchování špalku na rovných kovádlech P' se vypočítá ze vztahu:

$$P' = \frac{1535}{365} = 2,050$$

$$\frac{S_p * H_p}{S * H} = \frac{510 * 365}{255 * 360} = 2,03$$

$$PK = 1 * 1 * 1,26 * \sqrt{4,20} * 2,03 = = \underline{\underline{4,16}}$$

Pro dostatečné prokování výkovku je nutný celkový stupeň prokování minimálně 4.

#### **d) Určení maximální síly při kování**

Maximální deformační síla při kování u operace přechování za tepla se určí podle Siebelova vztahu:

$$F = p * \left(1 + \frac{\mu}{3} * \frac{d}{h}\right) * S \quad (28)$$

Kde:

F ... síla [N]

P ... deformační odpor [MPa] – pro ocel při teplotě 900-1100°C je 55-78MPa

S ... plocha stlačovaného polotovaru

$\mu$  ...0,45

$$F = 55 * \left(1 + \frac{0,45}{3} * \frac{500}{1535}\right) * 196349,5 = 11,3 \text{ MN}$$

Maximální síla pro napěchování za tepla je tedy 11,3MN.

## 11 Závěr

Cílem mé práce bylo zhodnotit vývoj technologie výroby dutých výkovků a nastínit tak jejich význam v kovárenském průmyslu. Diplomová práce je rozdělena celkem do devíti jednotlivých kapitol. V úvodu jsem uvedl výrobní základnu českého kovárenského průmyslu v době, kdy na území ČR bylo celkem 39 kováren. V druhé kapitole jsem teoreticky popsal ingot, který představuje výchozí polotovár pro výkovky dutých těles. Třetí kapitola uvádí oceli užívané pro výrobu dutých výkovků. Jde převážně o uhlíkové konstrukční oceli třídy 11 až 17. Ve čtvrté kapitole jsou popsány vlastnosti dutých výkovků od jejich průřezu a tvaru až po stanovení hmotnosti výkovků, jakožto nezbytný faktor pro technologa. Ten na základě vypočtené hmotnosti stanoví odpovídající ingot, s nejbližším vyšším směrným využitím těla při dodržení všech zásad a podmínek. V páté kapitole popisují kovářské operace dutých těles jako např. pēchovací zkouška. Ta byla prováděna a popsána také v experimentální části této práce. V šesté kapitole jsem popisoval tepelné a jakostní zpracování po dokování a v sedmé kapitole popsal metody zkoušení výkovků užívané v praxi. Všechny tyto metody jsou tzv. nedestruktivní. Jinak řečeno lze jimi kontrolovat součásti uvnitř i na povrchu bez jejich porušení.

Nejvíce jsem se zabýval experimentální částí. V prvním bodě jsem prováděl pēchovací zkoušku za tepla při různých teplotách. Poté co byly tělesa nařezány a změřeny, zabýval jsem se výpočty deformací všech vzorků. U těch vzorků nabývajících soudečkovitých tvarů po pēchování (jejímž výchozím polotovarem bylo těleso válcovitého tvaru), jsem k výpočtům deformací prováděl také výpočet soudečkovitosti. Další bod spočíval k zjištění mikrostruktury daných vzorků a jejich popis. Skladbu mikrostruktur jsem prováděl na základě metalografického výbrusu.

Cílem diplomové práce bylo porovnání vzorků skrz matematických výpočtů, stanovení velikosti zrna a rozbor mikrostruktur. Vzorky prošly pēchovací zkouškou při různých teplotách. Byly naměřeny hodnoty pro umožnění výpočetní části a provedena metalografická část pro stanovení vnitřních mikrostruktur.

## 12 Použitá literatura

- [1] TOMLINSON, M., TALAMANTES, S. J., DAVIES, P. The development of hollow ingot technology at Sheffield. In 18th International Forgemasters Meeting, Market and Technical Proceedings, USA, Pittsburgh, 2011, p. 175 – 178.
- [2] GREGER, M., MAŠEK, V. Open die forging of hollow bars. *Hutnické listy*, 2013, Vol. 66, No. 4, p. 26-30, ISSN 0018-8069.
- [3] MACHOVČÁK, P., OPLER, A., CARBOL, Z., et al. The development of hollow ingot casting technology at VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. International Conference METAL 2013, TANGER: 15. – 17. 5. 2013, Brno, CD ROM.
- [4] VOJTĚCH, D. Struktura, vlastnosti a zpracování kovových materiálů, 2008, s. ISBN 80 – 7080 – 500 – 4. 1989-1994: VŠCHT Praha.
- [5] SOJKA, J., DANEMARK, J., DOSTÁL, P., Annealing of Low Alloy Steels in the Endothermic Atmospheres. *Hutnické listy*, 2009, s. 66-70, No. 6, p. ISSN 0018-8069
- [6] GREGER, M., PETRŽELA, J., LÁSLÓ, V. Rozbor technologie kování dutých těles s vnitřním osazením. *Kovárenství*, 2011, č. 42, s. 9 – 12.
- [7] ČERMÁK J. Teorie a metodika tváření. Praha ČVUT 2014 [online]. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/ost/obory/tech/TMTV\\_prednasky\\_prezentace.pdf](http://www.strojar.com/upload/ost/obory/tech/TMTV_prednasky_prezentace.pdf)
- [8] DAVIS, J. R. Metals Handbook, Vol. 14, Forming and Forging, ASM Handbook, 1988
- [9] RECKER, D., FRANZKE, M., HIRT, G.: Forged hollow shafts for wind power drivers. 1. Conference for Wind Power Drivers, Aachen 2013, p. 199 – 214.
- [10] WOLFGARTEN, M., ROSENSTOCK, D., SCHAEFFER, L. et al. Implementation of an open-die forging process for large hollow shafts for wind power plants with respect to an optimizes microstructure, *La Metallurgia Italiana*, 2015, No. 4, p. 43 -49.

- [11] DVOŘÁK, M., MAREČKOVÁ M. Technologie tváření – Vybrané technologie objemového tváření za tepla. Brno VUT 2006 [online]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/technologie\\_tvareni/index.htm](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/index.htm)
- [12] SEDLÁK, O. Pěchovací zkoušky a jejich význam, bakalářská práce, 2009 [online]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15016](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15016)
- [13] SALÁK, J. Technologický postup volné kovaného výkovku. Plzeň 2013 [online]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Vykovek.pdf>
- [14] SEMIATIN, S. I. ASM Handbook. Vol. 14A, Metalworking, Bulk Forming Materials Park, Ohio 2005, 888 s.
- [15] FOREJT, M. Teorie tváření. Nakladatelství VUT v Brně, 1992, s. 167. ISBN 80-214-0415-9
- [16] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F. NOVOTNÝ, E. Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Akademické nakladatelství CERM,s.r.o. Brno, 2003, s. 171. ISBN 80-214-2340-4.
- [17] Metody zkoušení výkovků [online]. Dostupné z: <http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/KatalogNDTProduktu.pdf>